

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПАЛАНЮК ОЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

УДК 531.31:621.86

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВИХ  
ТРАНСФОРМАТОРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ  
МЕРЕЖ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело \_\_\_\_\_ О. В. Паланюк

Науковий керівник:

Грабко Володимир Віталійович,  
доктор технічних наук, професор

## АНОТАЦІЯ

Паланюк О.В. Методи і засоби діагностування обмоток силових трансформаторів розподільних електричних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 – «Електрична інженерія». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2022.

Енергетика в сучасних умовах – це сукупність ряду складних систем по генерації та перетворенню енергетичних ресурсів, виробленню, передачі та використанню всіх видів енергії. Сучасний розвиток електроенергетики України направлений на забезпечення безперервного постачання електроенергії для всіх галузей економіки і базується на потужній, розгалуженій електроенергетичній системі, до якої входять великі електростанції, внутрішні і міжсистемні зв'язки у вигляді ліній електропередач та широкі електричні зв'язки зі споживачем. Водночас велика частина електрообладнання пропрацювало 25 і більше років. Силові трансформатори – один із основних та найдорожчих елементів електрообладнання електроенергетичної системи, причому їх аварійний вихід з ладу призводить до значних збитків.

Робочий ресурс силового трансформаторів, як і будь-якого іншого електрообладнання, з часом витрачається.

До основних пошкоджень, які виникають в процесі експлуатації силового трансформатора, відносяться погіршення ізоляційних властивостей високовольтних вводів, виникнення несправностей в роботі пристрою регулювання під навантаженням, погіршення властивостей трансформаторного масла, деформація обмоток внаслідок дії динамічних сил при протіканні через трансформатор струмів короткого замикання, виникнення в ізоляції часткових розрядів тощо.

Однією з основних причин виходу з ладу трансформаторів є погіршення технічного стану ізоляції обмоток, на яку впливають різні чинники. Однією з основних причин із-за яких погіршується стан ізоляції, є вплив температури, обумовлений навантаженням трансформатора. Відомо, що силові трансформатори піддаються різноманітним впливам за рівнем навантаження та перевантаженням, які мають характер довгострокового або короткострокового впливу. Окрім того, на силові трансформатори здійснюється вплив навколишнього середовища.

Як відомо, існує ряд методів та математичних моделей, які дозволяють оцінити стан витрачання ізоляції при довгострокових навантаженнях або перевантаженнях. В багатьох випадках реалізація засобів діагностування того чи іншого вузла силового трансформатора за відомими математичними моделями спрямована на дослідження роботи трансформатора при його введенні в роботу або в міжремонтний період, коли трансформатор виведений з експлуатації і є можливість, не боячись враження електричним струмом, здійснити вимірювання необхідних діагностичних параметрів. За такими підходами розроблено ряд пристроїв, що дозволяють діагностувати технічний стан силових трансформаторів по різних його вузлах та елементах конструкції. По іншому ставиться питання, коли силовий трансформатор необхідно діагностувати в процесі його роботи.

Відомі пристрої, які дозволяють оцінювати стан обмоток трансформаторів та оцінювати перспективу тривалості їх нормальної роботи без виведення силового трансформатора з експлуатації. Це порівняно нескладно реалізовувати, коли іде мова про тривалу роботу трансформатора в режимі сталого навантаження, що не перевищує номінальне. Проте мають місце і короткострокові навантаження і, особливо, перевантаження, які протягом короткого терміну спричиняють виділення тепла в обмотки та суміжні елементи конструкції трансформатора.

Часто таке виділення тепла залишається поза увагою оперативного персоналу, оскільки в багатьох випадках воно на рівень температури на

поверхні обмотки або на поверхні бака силового трансформатора ніяк не відображається внаслідок властивості інерційності теплопередачі. Але, очевидно, що такі навантаження також впливають на стан ізоляції обмоток, особливо в місцях, ближчих до середини їхніх шарів і результати їх впливу виявити набагато складніше.

Очевидним є факт, що в середині шарів обмотки виділяється найбільша кількість тепла, а, отже, має місце і найвища температура, яка знижується по мірі віддалення від середини обмотки до її верхнього шару.

Тому раннє виявлення місць можливого пошкодження ізоляції обмоток силових трансформаторів дозволяє прогнозувати їх робоздатність та підвищити надійність роботи, що в свою чергу покращує надійність роботи електричних мереж в цілому.

Оскільки більшість силових трансформаторів знаходяться в експлуатації уже значний термін, тому доцільно розробити методику яка дозволить прогнозувати термін роботи ізоляції силових трансформаторів які уже введені в експлуатацію, таким чином підвищити надійність роботи обладнання яке уже працює, а також розроблена методика має мати можливість використання і для нового обладнання яке встановлюється.

Світові тенденції з діагностування та підвищення надійності силових трансформаторів, так чи інакше, стикаються з вирішенням проблеми створення методу діагностування, який інтегрований в технологічний процес роботи силового трансформатора, що функціонує у розподільчих електричних мережах. Тому методика діагностування повинна володіти високою ефективністю і продуктивністю, відрізнятися доступністю методів контролю та матеріалів, що застосовуються при цьому. Методика повинна включати фізично обґрунтовані математичні моделі, що дозволяють формалізувати наші уявлення про стан об'єкта контролю і допускати формування підсумкового висновку. Коригувальні заходи, сформульовані у підсумковому висновку, повинні передбачати заходи, що унеможливають відмову експлуатованого.

В дисертаційній роботі розв'язана задача зі створення методів та засобів

для діагностування обмоток силових трансформаторів та ідентифікації математичних моделей для визначення залишкового ресурсу ізоляції обмоток силових масляних трансформаторів. Впровадження розроблених методів і засобів дозволять покращити роботу силових трансформаторів а також підвищити надійність енергетичної системи в цілому. В результаті дисертаційного дослідження отримані такі результати.

Здійснено огляд наукових праць присвячених дослідженню методів і засобів діагностування обмоток силових масляних трансформаторів, та наведено огляд найбільш важливих методів, які є поширеними і найбільш часто використовуються, для контролю стану та діагностики силових трансформаторів, де підкреслюється важливість покращення існуючих методів діагностики, які можна застосовувати без виведення трансформаторів з експлуатації, і що також може надати критерії критичної несправності, зокрема для визначення цілісності обмоток трансформаторів.

Показано, що результати, отримані в дослідженнях ряду вчених, присвячених розв'язанню задачі виявлення найбільш нагрітої точки та прогнозування вичерпаного ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора, вимагають суттєвої корекції, оскільки вони отримані з використанням застарілих математичних моделей електричних машин які не враховують короточасні стрибки навантаження, які також впливають на стан ізоляції обмоток силових трансформаторів.

Вперше запропоновано розв'язувати задачу для виявлення найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора без використання різного роду сенсорів, а лише з використанням законів теплопередач, також запропонована математична модель яка дозволяє прогнозувати ступень перегріву обмотки силового трансформатора по всій висоті обмотки та в будь-якій точці первинної і вторинної обмотки.

Запропоновано методику для визначення впливу зовнішніх факторів для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі перевантаження, на основі нечітких

правил для сухих та масляних силових трансформаторів. Одночасно з цим розроблена методика для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора на основі нейронної мережі, що дає змогу прогнозувати тривалість роботи при перевантаженні без шкоди ізоляції для сухих трансформаторів.

Для оцінювання адекватності моделі для визначення теплового старіння ізоляції на основі законів теплопередачі здійснене імітаційне моделювання роботи силового масляного трансформатора в режимі короткочасних стрибків навантаження. Отримані результати моделювання та їх аналіз підтверджують теоретичні виклади і ефективність синтезованої математичної моделі.

Запропоновано варіант реалізації системи для визначення залишкового ресурсу ізоляції обмотки силового масляного трансформатора з підтримкою відображення ресурсу ізоляції в режимі реального часу. Проведено аналіз сучасних засобів для контролю ізоляції силового масляного трансформатора та пошук серед них таких, які доцільно використати для реалізації авторського варіанту в рамках запропонованої ними концепції, а також можливі способи розширення функціоналу системи шляхом інтеграції додаткових підсистем які дозволять підвищити ефективність запропонованої системи.

Ключові слова: трансформатора, нейронна мережа, математична модель, моделювання, діагностування, ізоляція, залишковий ресурс, трансформаторне масло, мікропроцесор.

## ABSTRACT

Palaniuk O.V. Methods and means of diagnosing windings of power transformers of distribution electric networks. - Qualifying scientific work in the direction of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy, specialty 141 - "Electric power, electrical engineering and electromechanics", field of knowledge 14 - "Electrical engineering". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2022.

Energy in modern conditions is a combination of a number of complex systems for the generation and transformation of energy resources, production, transmission and use of all types of energy. The modern development of the electric power industry of Ukraine is aimed at ensuring the continuous supply of electricity for all sectors of the economy and is based on a powerful, extensive electric power system, which includes large power plants, internal and intersystem connections in the form of power lines, and extensive electrical connections with the consumer. At the same time, most of the electrical equipment has worked for 25 years or more. Power transformers are one of the main and most expensive elements of the electrical equipment of the power system, and their emergency failure leads to significant losses.

The working resource of power transformers, like any other electrical equipment, is used up over time.

The main damages that occur during the operation of a power transformer include the deterioration of the insulating properties of high-voltage inputs, the occurrence of malfunctions in the operation of the regulation device under load, the deterioration of the properties of the transformer oil, the deformation of the windings due to the action of dynamic forces when short-circuit currents flow through the transformer, the occurrence of insulation partial discharges, etc.

One of the main reasons for the failure of transformers is the deterioration of the technical condition of the insulation of the windings, which is affected by various

factors. One of the main reasons due to which the condition of the insulation deteriorates is the influence of temperature due to the load of the transformer. It is known that power transformers are exposed to various influences according to the level of load and overload, which have the character of long-term or short-term influence. In addition, power transformers are affected by the environment.

As you know, there are a number of methods and mathematical models that allow you to assess the state of insulation wear during long-term loads or overloads. In many cases, the implementation of tools for diagnosing this or that node of a power transformer according to known mathematical models is aimed at studying the operation of the transformer when it is put into operation or during the inter-repair period, when the transformer is taken out of service and there is an opportunity, without fear of electric shock, to measure the necessary diagnostic parameters. Based on such approaches, a number of devices have been developed that allow diagnosing the technical condition of power transformers according to its various nodes and structural elements. On the other hand, the question arises when the power transformer must be diagnosed during its operation.

There are known devices that allow you to assess the condition of transformer windings and to assess the perspective of the duration of their normal operation without decommissioning the power transformer. It is relatively easy to implement when it comes to the long-term operation of the transformer in the steady load mode, which does not exceed the nominal one. However, there are also short-term loads and, especially, overloads, which during a short period of time cause the release of heat in the windings and adjacent elements of the transformer structure.

Often, such heat release remains unnoticed by operational personnel, since in many cases it is not reflected in the temperature level on the surface of the winding or on the surface of the power transformer tank due to the property of inertia of heat transfer. However, it is obvious that such loads also affect the condition of the insulation of the windings, especially in places closer to the middle of their layers, and the results of their influence are much more difficult to detect.

It is an obvious fact that the largest amount of heat is released in the middle



of the winding layers, and, therefore, the highest temperature occurs, which decreases with distance from the middle of the winding to its upper layer.

Therefore, early detection of places of possible damage to the insulation of the windings of power transformers makes it possible to predict their performance and increase the reliability of work, which in turn improves the reliability of electrical networks as a whole.

Since the majority of power transformers have been in operation for a considerable period of time, it is therefore advisable to develop a method that will allow predicting the life of the insulation of power transformers that have already been put into operation, thus increasing the reliability of the equipment that is already in operation, and also the developed method should be able to be used for new equipment that is installed.

Global trends in diagnosing and improving the reliability of power transformers, one way or another, face the problem of creating a diagnostic method that is integrated into the technological process of power transformers operating in distribution electrical networks. Therefore, the diagnostic technique should have high efficiency and productivity, be distinguished by the availability of control methods and materials used in this. The methodology should include physically based mathematical models that allow us to formalize our ideas about the state of the object of control and allow the formation of a final conclusion. Corrective measures, formulated in the final conclusion, should include measures that prevent the refusal of the exploited.

In the dissertation, the task of creating methods and tools for diagnosing the windings of power transformers and identifying mathematical models for determining the residual insulation resource of the windings of power oil transformers is solved. Implementation of the developed methods and means will improve the operation of power transformers and increase the reliability of the energy system as a whole. As a result of the dissertation research, the following results were obtained.

A review of scientific works dedicated to the research of methods and means

of diagnosing the windings of power oil transformers is carried out, and an overview of the most important methods that are common and most often used for monitoring the condition and diagnostics of power transformers is given, which emphasizes the importance of improving existing diagnostic methods that can be applied without decommissioning of transformers, and which can also provide critical failure criteria, in particular for determining the integrity of transformer windings.

It is shown that the results obtained in the studies of a number of scientists, dedicated to solving the problem of identifying the most heated point and predicting the exhausted resource of the insulation of the windings of a power transformer, require a significant correction, since they were obtained using outdated mathematical models of electric machines that do not take into account short-term load jumps, which also affect the condition of the insulation of the windings of power transformers.

For the first time, it was proposed to solve the problem of identifying the most heated point of the transformer winding without the use of various sensors, but only with the use of heat transfer laws, a mathematical model was also proposed that allows predicting the degree of overheating of the power transformer winding along the entire height of the winding and at any point of the primary and secondary winding.

A methodology is proposed for determining the influence of external factors for the assessment of thermal aging of the insulation of the windings of a power oil transformer operating in overload mode, on the renewal of fuzzy rules for dry and oil power transformers. At the same time, a method was developed for determining the thermal aging of the insulation of the windings of a power dry transformer based on a neural network, which makes it possible to predict the duration of operation when overloaded without damaging the insulation for dry transformers.

In order to evaluate the adequacy of the model for determining the thermal aging of insulation based on the laws of heat transfer, simulation modeling of the operation of a power oil transformer in the mode of short-term load jumps was carried out. The simulation results obtained and their analysis confirm the theoretical

statements and the effectiveness of the synthesized mathematical model.

A variant of the implementation of the system for determining the residual resource of the insulation of the winding of a power oil transformer with the support of displaying the resource of the insulation in real time is proposed. An analysis of modern means for controlling the isolation of a power oil transformer was carried out and a search among them for those that could reasonably be used for the implementation of the author's version within the framework of their proposed concept, as well as possible ways of expanding the functionality of the system by integrating additional subsystems that will increase the efficiency of the proposed system.

Key words: transformer, neural network, mathematical model, simulation, diagnostics, insulation, residual resource, transformer oil, microprocessor.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІ**

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:**

[1] Паланюк, О.В. 2022. МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2 (Квіт. 2022), 54–59. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-54-59>.

[2] Грабко, В.В. і Паланюк, О.В. 2022. НЕЧІТКА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТЕРМІНУ РОБОТИ СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМІ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 4 (Верес. 2022), 27–33. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-27-33>.

[3] Паланюк, О.В. 2022. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВИТРАЧАННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 6 (Груд. 2022), 42–47. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-42-47>.

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у закордонному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу:**

[4] Grabko, V., Tkachenko, S., & Palaniuk, O. (2021). Determination of temperature distribution on windings of oil transformer based on the laws of heat transfer. *ScienceRise*, (5), 3-13. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.002140>.

**– документи інтелектуальної власності, що отримані за результатами дисертації – патенти на корисну модель:**

[5] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/00. № 141472 МПК (2006), 10.04.2020.

[6] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R31/62. № 144739 МПК (2020), 26.10.2020.

[7] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк, В. П. Ткачук «Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/06. № 137542 МПК (2006.01), 25.10.2019.

[8] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/62. № 140601 МПК (2020.01), 10.03.2020.

[9] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/00. № 141471 МПК (2006), 10.04.2020.

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

[10] О. В. Паланюк «Способи діагностування пошкоджень і аналізу ресурсу обмоток силового трансформатора». "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)", м. Вінниця, 15-17 жовтня 2018 р. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22717>.

[11] О. В. Паланюк, В.В, Грабко «Математична модель для оцінки стану ізоляції силового трансформатора на основі теорії нечітких множин». Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021)", м. Вінниця, 13 жовтня 2021 р. ВНТУ,– Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey2021/paper/view/137> -21.

[12] О. В. Паланюк, «Можливості іот для використання в енергетиці і промисловості» XLVIII Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2019)

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7084>. -

[13] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «Застосування нейронної мережі для діагностування силового сухого трансформатора» // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10354>.

[14] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «Математична модель для діагностування силового сухого трансформатора» // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10155>.

[15] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «До питання діагностування силового трансформатора»// Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Електрон. текст. дані. – 2019. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7294>.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	17
ВСТУП .....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	23
1.1 Аналіз існуючих методів оцінювання ступеня зносу ізоляції силового трансформатора .....	26
1.2 Аналіз існуючих засобів оцінювання ступеня зносу ізоляції силового трансформатора .....	36
1.3 Висновки та постановка задачі дослідження .....	42
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	44
2.1 Математична модель для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі .....	45
2.2 Нечітка математична модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, який працює в режимі перевантаження .....	56
2.3 Нечітка математична модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження .....	63
2.4 Математична модель для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора на основі нейронної мережі .....	73
2.5 Висновки по матеріалу другого розділу .....	81
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	83
3.1 Синтез структури пристрою для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі.....	83
3.2 Синтез структури пристрою для нечіткої математичної моделі визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора. ....	88
3.3 Висновки по матеріалам третього розділу .....	102

РОЗДІЛ 4	МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ СТРУКТУР ТА ОЦІНКА ЇХ ТОЧНОСТІ РОБОТИ .....	104
4.1	Мікропроцесорний засіб для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора на основі законів теплопередачі .....	105
4.2	Комп'ютерне моделювання отриманих моделей, засобів діагностування .....	110
4.3	Оцінка точності синтезованих засобів.....	113
4.3.1	Вибір сенсорів температури та їх похибки .....	115
4.3.2	Вибір сенсорів струму та напруги і їх похибки .....	116
4.3.3	Похибка перетворювачів синусоїдального сигналу в сигнал постійного струму .....	117
4.3.4	Оцінювання похибки квантування АЦП .....	120
4.4	Оцінювання вірогідності контролю стану ізоляції обмоток силового масляного трансформатора за помилками першого і другого роду .....	121
4.5	Висновки по матеріалам четвертого розділу .....	126
	ВИСНОВКИ.....	127
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	129
	ДОДАТКИ.....	148
	НЕЧІТКА БАЗА ЗНАНЬ .....	149
	СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА .....	152
	АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	155



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АЦП	- Аналого-цифровий перетворювач
БОП	- Блок оперативної пам'яті
ЕОМ	- Електронно-обчислювальна машина
ОП	- Оперативний персонал
МК	- Мікроконтролер
ППП	- Пакет прикладних програм
ТС	- Трансформатор струму
ШНМ	- Штучна нейронна мережа

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

На сьогодні у нинішніх умовах економічного і енергетичного розвитку нашої держави важливим завданням в енергетиці постає питання продовження експлуатації енергетичного обладнання понад встановлений термін, а також попередження аварійних відключень і поломок, саме ці заходи і дозволяють підвищити надійність енергетичної системи в цілому. На даний момент капіталовкладення, що здійснюються в енергетичну галузь, є недостатніми і не вирішують проблеми що зараз є в галузі, оскільки більшість енергетичного обладнання є застарілим.

Саме тому за умов недостатнього фінансування необхідним є використання діагностики енергетичного обладнання для запобігання критичних і раптових поломок, що в свою чергу приносить великі фінансові збитки для енергетичної галузі. Проте даний підхід вимагає застосування надійних засобів діагностування, нехтуванням якого може призвести до передчасного виходу з ладу і привести до аварійних ситуацій.

На сьогодні існує безліч підходів для визначення технічного стану різних видів електрообладнання, а тому для визначення діагностичних ознак використовуються і адаптуються різні підходи. Потрібно зазначити, що в деяких випадках інформація для діагностування надається у технічному паспорті на відповідне обладнання, що спрощує підхід до діагностування та аналізу функціонування обладнання.

До всіх складових електричної мережі завжди ставлять особливі вимоги з надійності їх роботи. Звичним явищем стало виведення всіх показників технічного стану, параметрів роботи обладнання на монітор комп'ютера. З виведенням інформації про параметри роботи нині особливих проблем не виникає, проте отримання аналізу технічного стану є складним завданням. Важливу роль в роботі електричної мережі займають потужні силові масляні

трансформатори, саме від надійної роботи цього обладнання і залежать надійність функціонування електричної мережі в цілому.

Так, до потужних силових масляних трансформаторів ставлять високі вимоги з надійної роботи. Їх особливістю є короткотривала робота в режимі перевантаження, що пов'язана з частими стрибками навантаження, при підвищених потребах електроенергії в певні проміжки на протязі доби. Є достатньо підходів для визначення ступеня спрацювання в нормальному режимі роботи, проте підходів для визначення ступеня спрацювання ізоляції обмоток силового масляного трансформатора при короткочасних стрибках навантаження розроблено недостатньо.

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі – підвищення надійності функціонування потужних силових масляних трансформаторів шляхом його діагностування

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету у відповідності до наукового напрямку «Розробка математичних моделей процесів, що протікають в електричних та енергетичних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного та автоматизованого керування цими процесами», зокрема дисертаційне дослідження пов'язане з кафедральною науково-дослідною темою № 29 КЗ «Діагностика, захист від аварійних режимів та методи експлуатації електрообладнання автоматизованих та автоматичних систем промислових підприємств і транспорту».

**Об'єктом дослідження** є процес витрати ресурсу ізоляції силового трансформатора.

**Предметом дослідження** – закономірності теплового зносу ізоляції обмоток силового трансформатора при різних значеннях струму що протікає в трансформаторів в залежності від різних факторів впливу.

**Методи дослідження** – використання законів теплопередачі в мателевих пластинах з внутрішнім джерелом тепла, теорія нечітких множин, математична модель штучної нейронної мережі та комп'ютерного експерименту. Дослідження виконувалися із використанням прикладних пакетів програм MATLAB.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

Результати отримані в процесі дисертаційного дослідження несуть нижченаведену наукову новизну:

- вперше розроблено математичну модель для оцінки температури обмоток силового трансформатора шляхом визначення кількості енергії, що виділяється у витках обмотки, з урахуванням віддачі тепла трансформаторному маслу, яке рухається з певною швидкістю, та геометрії проводу обмоток, що дозволяє відслідковувати короточасні стрибки навантаження та враховувати їх при оцінці старіння ізоляції обмоток силового трансформатора та спрацьовуванні їх залишкового робочого ресурсу;

- удосконалено на основі теорії нечітких множин математичну модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі короточасних стрибків навантаження, яка на відміну від відомих дозволяє підвищити точність оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток шляхом врахування додаткових факторів впливу;

- удосконалено на основі теорії нечітких множин математичну модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження, яка на відміну від відомих дозволяє підвищити точність оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток шляхом врахування додаткових факторів впливу;

- розроблено математичну модель на основі нейронної мережі для визначення допустимої тривалості ввімкнення силового сухого трансформатора в режимі перевантаження, з налаштуванням параметричної оптимізації нечіткої моделі для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток

силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження та з рахуванням додаткових факторів впливу.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблені в дисертації математичні моделі для визначення залишкового ресурсу ізоляції обмоток силових масляних трансформаторів при короткочасних перевантаженнях та при роботі в режимі перевантажень, дозволять підвищити надійність роботи силового трансформатора при будь-яких видах перевантажень шляхом оцінки і прогнозування ресурсу ізоляції, тим самим покращуючи надійність енергетичної системи в цілому. Тож отримані в дисертації результати можуть бути практично використані для аналізу роботи силових трансформаторів, як нових так і тих, що експлуатуються уже.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи із науковими результатами опубліковано як у співавторстві так і одноосібно. У роботі [1] (нумерація згідно додатку Б) розроблений мікропроцесорний засіб для діагностування обмоток силового масляного трансформатора на основі розробленої математичної. За матеріалами викладених в роботах [2] розроблено нечітку математичну моделей тривалості роботи силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження і розроблено штучна нейронна мережа в пакеті прикладних програм MATLAB для можливості прогнозування допустимих термінів перевантаження на проміжних значеннях температури які не задані паспортом виробника. Для роботи [3] проведено аналіз наукових робіт, що присвячені питанням визначення найбільш нагрітої точки обмотки силового масляного трансформатора, необхідної для розробки математичної моделі яка дозволить визначати температури обмотки опосередковим методом. А також запропоновано метод визначення температури обмоток силового масляного трансформатора, в основу якого покладено закони теплопередачі від тіла з внутрішнім джерелом тепла до рідини, що омиває тіло.

**Апробація матеріалів дисертації.** Результати та основні наукові положення пройшли апробацію на: конференції «Контроль і управління в складних системах» у м. Вінниця 2018 року, на конференції «Оптимальне керування електроустановками» у м. Вінниця у 2021 році, на XLVIII науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки у м. Вінниця у 2019 році, на LI науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки у м. Вінниця у 2022 році, на XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ у 2020, на XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ у 2019 році.

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 15 наукових роботах, із яких 6 є тезами доповідей на науково-технічних конференціях, опублікованих в базі електронних наукових видань Вінницького національного технічного університету, 3 статті опубліковано у наукових журналах, що входять до переліку фахових видань, 1 статтю опубліковано у закордонному науковому журналі, що видається в країні, яка є членом ЄС, та 5 патентів на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 157 сторінок основного тексту. Список використаних джерел налічує 157 найменувань. Текст ілюструється 41 рисунками та містить 10 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Проблема контролю стану трансформаторів виникла відразу, як тільки з'явилися закриті масляні трансформатори. Для того, щоб контролювати у якому стану знаходиться трансформатор, необхідно було провести відключення, злити масло, виконати ревізію. Все це слід виконувати з дотриманням численних правил.

В даний час в електроенергетиці і електротехніці велика увага приділяється узгодження умов нормальної безаварійної і ефективної роботи електроустановок.

Основна причина пошкодження силових трансформаторів в процесі експлуатації - це недостатня ефективність прийнятої в даний час системи діагностики. До основних методів діагностування силових трансформаторів відносяться тепловізійний, вібраційний, електричний, радіохвильовий, оптичний, вихрострумний, акустичний, метод часткових розрядів та інші, які в основному орієнтовані на застосування в системі планово-попереджувального обслуговування і випробувань обладнання.

При діагностиці трансформаторного обладнання важливим є опис можливих дефектів у системі високоінформативних показників. Використання неінформативних показників виявляється не тільки не корисним, викликаючи необґрунтовані витрати на їх вимірювання, але й знижує ефективність самого процесу діагностування що приводить до прийняття помилкових рішень під час оцінювання технічного стану.

Один з головних принципів технічної діагностики – діагностична цінність ознаки, що визначається інформацією, яка вноситься ознакою в систему станів (діагнозів). У зв'язку з цим вірне формування множини ознак та їх сукупностей є основою для визначення технічного стану обладнання та прийняття рішень про його подальшу експлуатацію.

Сьогодні технічний стан силових трансформаторів оцінюється великою кількістю нормованих параметрів. При цьому сутність принципу контролю технічного стану полягає в перевірці відповідності ознак вимогам діючого нормативного документу [1]. Однак просте використання всієї інформації, що надходить при оцінюванні технічного стану трансформаторів, може призводити до непорозумінь, оскільки рівень інформації, яка отримується під час вимірювання того чи іншого параметра, нерідко вважають більш високим, ніж це є в реальності.

В сучасних умовах в експлуатації електрообладнання здійснено перехід від системи планово-попереджувальних ремонтів, яка передбачала технічне обслуговування і ремонт електричного обладнання через визначені терміни, до системи обслуговування за технічним станом електрообладнання [2].

Переваги такого підходу очевидні, оскільки відпадає необхідність виконання комплексу профілактичних робіт на обладнанні, яке має задовільний технічний стан. Відомо, що будь-яке втручання в електрообладнання, проведене навіть фахівцями високого рівня, призводить до зниження надійності і зменшення терміну служби, оскільки при цьому порушуються з'єднання і відбувається нова приробка деталей, що супроводжується інтенсивним спрацюванням елементів конструкцій. Крім того, в процесі виконання робіт можливе ушкодження окремих деталей та вузлів.

Метою технічного діагностування електрообладнання є забезпечення найбільш економічної його експлуатації при заданому рівні надійності і скороченні до мінімуму витрат на технічне обслуговування і ремонт. Ця мета досягається шляхом відслідковування технічного стану електрообладнання в процесі експлуатації, що дозволяє своєчасно запобігати відмовам, скорочувати простої через пошкодження, проводити комплекс заходів для підтримки його роботоздатності відповідно до даних діагностування [3, 4].

Задачі технічної діагностики в системі експлуатації електрообладнання полягають у встановленні необхідності заміни змінних деталей і вузлів,



проведенні регулювання, виконанні поточних та капітальних ремонтів, якості їх виконання, встановленні причин можливих відмов електрообладнання [5].

Очевидно, що будь-яка відмова електрообладнання, що викликає створення аварійної ситуації, призводить до значних втрат, пов'язаних із призупиненням електропостачання, псуванням обладнання та продукції тощо. Особливо ця проблема гостро стосується електростанції, аварія на якій призводить до недовідпуску електричної або теплової енергії з усіма можливими наслідками.

Відомо, що високі вимоги з надійності роботи ставляться до силових трансформаторів електростанцій, які забезпечують перетворення та передачу електроенергії від генераторів до споживачів.

В зв'язку з цим виникає необхідність виконання цілого ряду операцій по управлінню і контролю стану обладнанням за допомогою автоматичних пристроїв, які діють при порушенні режиму роботи чи виникненні несправності технологічного обладнання.

Впровадження нових методів, які дозволяють діагностувати в процесі експлуатації за допомогою сучасних засобів автоматизації та прийняття рішень і відповідних їм технічних засобів, створює можливість переходу до більш економічної і ефективної стратегії технічного обслуговування систем захистів за їх станом.

Важливим елементом роботи силового масляного трансформатора є його обмотки, які при перевантаженнях втрачають свій ізоляційний ресурс, тому останнім часом використовують сенсори, які влітаються в обмотку силового трансформатора на етапі виробництва, для відображення точної картини ступеня перегріву.

Тому останнім часом для визначення ступеню нагріву обмоток використовують оптично волоконні сенсори, зокрема в роботах [6 – 8]. Проте такий підхід вимагає додаткових капіталовкладень на етапі виробництва і тривалого часу для здійснення переоснащення силового масляного трансформатора, до тому деякі трансформатори немає змоги оснастити даним

видом моніторингу, оскільки на їх заміну потрібно поставити інший повноцінний трансформатор.

Тому постає питання пошуку нових шляхів для визначення та прогнозування технічного стану електрообладнання з метою підвищення надійності його експлуатації.

Очевидно, що в межах цієї роботи неможливо приділити достатньо уваги всім видам діагностування силового масляного трансформатора, а тому ми зосередимо зусилля на питаннях підвищення надійності роботи обмотки силового трансформатора.

### **1.1 Аналіз існуючих методів оцінювання ступеня зносу ізоляції силового трансформатора**

Силкові масляні трансформатора займають важливу роль в плані передачі та розподілу електричної енергії, саме через це до них ставлять високі вимоги щодо надійності функціонування. Потрібно зазначити, що питання підвищення надійності роботи силових масляних трансформаторів було актуальне з початку експлуатації першого трансформатора. На сьогодні існує багато робіт по дослідженню надійності функціонування, в тому числі і у напрямку їхнього діагностування в процесі роботи.

Завдання, які розв'язуються в процесі діагностування, можна сформулювати як [9]:

- виявлення дефектного стану трансформатора;
- визначення характеру дефекту;
- локалізація дефекту при найбільшій можливій глибині діагностування;
- оцінка роботоздатності трансформатора, прогноз його залишкового ресурсу та визначення часу коли потрібний ремонт.

Статистика пошкоджень, що виникають в потужних силових трансформаторах, свідчить, що 48 % з них викликані пробоем внутрішньої ізоляції введів, 14 % – недостатньою стійкістю при коротких замиканнях, 12

% – через спрацювання ресурсу ізоляції обмоток, 7 % – через пошкодження ізоляції обмоток, 5 % – через пошкодження пристрою регулювання під навантаженням (РПН) [10, 11]. Тому енергосистеми ставлять вимоги до укомплектування силових трансформаторів діагностичними системами [10].

Режими роботи силових масляних трансформаторів сьогодні і 20 років тому відрізняються через швидкий ріст електроспоживання. Оскільки завантаженість силових масляних трансформаторів постійно росте, то і старіння ізоляції в силових масляних трансформаторах постійно пришвидшується через підвищення навантаження. Значна частина поломок силових масляних трансформаторів зумовлена виникненням внутрішнього короткого замикання, що обумовлено спрацюванням ізоляції обмоток [12].

Спеціалісти з закордонних енергетичних компаній вважають економічно доцільним проведення неперервного контролю стану силових трансформаторів, а, отже, і створення різноманітних діагностичних та експертних систем [13].

Швидкість втрати ресурсу внаслідок старіння ізоляції трансформатора збільшується вдвічі при кожному підвищенні температури  $6^{\circ}\text{C}$ . Декілька років тому старіння ізоляції базувалося на правилі  $8^{\circ}\text{C}$ , яке було замінено правилом  $6^{\circ}\text{C}$ , більш близьким до фактичної поведінки ізоляції целюлози при різних температурах.

Як відомо зменшення ресурсу ізоляції залежить не тільки від перегріву, а й від вмісту продуктів старіння під час тривалої експлуатації волога і газ(повітря) потрапляють в ізоляцію з навколишнього середовища. Швидкість проникнення залежить від способу захисту трансформатора від впливів навколишнього середовища, перевищення температури трансформатора над температурою навколишнього середовища. Як наслідок, в ізоляції з'являються вода, газ (в тому числі кисень), продукти старіння твердої ізоляції і масла. Всі ці фактори погіршують процес теплообміну трансформатора, а тому рівняння Монзінгера потрібно модифікувати для розрахунку відносного зносу ізоляції

з урахуванням вищерозглянутих експлуатаційних факторів для певного інтервалу часу.

У роботі [14] розглянутий вплив різних експлуатаційних факторів на швидкість старіння паперової ізоляції силових трансформаторів. Запропоновано уточнення формули Монзінгера для розрахунку в системах безперервного контролю відносного старіння ізоляції з урахуванням впливу вологовмісту твердої ізоляції, ступеня окислювання масла і вмісту кисню в маслі. Можна зазначити, що відомі підходи не виключають доцільність створення нових методів та засобів діагностування трансформаторів.

Значна увага в плані теплового зносу ізоляції приділяється температурі не лише обмоток, а й температурі масла силового трансформатора. Так, в роботі [15] описується стала часу нагріву в обмотках силового трансформатора з урахуванням відомих величин-маси обмоток, маси бака з радіаторами або охолоджувачами, маси магнітопроводу. Стала часу нагрівання обмотки значно менша сталої часу нагріву трансформатора і становить величину порядку декількох хвилин. При ступінчастій зміні навантаження температура обмотки в найбільш нагрітій точці в момент зміни навантаження змінюється стрибком від одного сталого значення до іншого, а далі змінюється відповідно до зміни температури масла.

В роботі [16] запропоновано оцінювати термін служби силового трансформатора, використовуючи відносні одиниці. Даний метод дозволяє оцінити старіння ізоляції без знання фактичних значень температури і часу, а оперуючи тільки їх відносними значеннями. Отримана критеріальна модель надійності трансформаторів представляє залежність відносного зносу ізоляції обмоток трансформатора від відносного значення струму навантаження. В статті описано розрахунок відносного зносу ізоляції від струму навантаження, що дозволило отримати залежність зносу ізоляції (величини, зворотної до терміну служби) від струму навантаження. В експлуатації це найзручніше, так як струми навантаження контролюються відповідними приладами при роботі трансформаторів, а температура вимірюється епізодично. Критеріальна

модель, яка використовує відносні одиниці, дозволяє оцінити відразу кількісно зміну зносу ізоляції в відносних одиницях або відсотках без знання дійсної їхньої величини в іменованих одиницях.

Відомий підхід [17], який передбачає визначення витрати ресурсу твердої ізоляції в силових трансформаторах, наповнених маслом, за ступенем полімеризації паперу і за ступенем термічного старіння ізоляції, обчисленої за формулою Монтзінгера. Порядок розрахунку зносу ізоляції відбувається з урахуванням процесів гідролізу та окислення в ізоляції, що призводять до значного прискорення деполімеризації целюлози. Недоліком підходу є необхідність залучення людини для оцінки стану і прогнозування надійної роботи.

Згідно з [18] на старіння ізоляції впливає і навколишнє середовище. Тому для більш точного визначення ступеня старіння необхідно враховувати зміни температури навколишнього середовища і навантаження на обладнання. При постійних змінах навантаження і зовнішньої температури відповідно міняється і швидкість старіння.

Діагностування силових трансформаторів здійснюється різними підходами, тобто різні підходи передбачають прив'язку до різних взаємозалежних процесів, що протікають в силових трансформаторах, зокрема в обмотках. Для більш точного визначення ресурсу ізоляції силового трансформатора потрібно також враховувати і взаємо залежні процеси.

Так, в роботі [19] використовується рівняння Монтзінгера з урахуванням сучасних підходів до дослідження процесів теплового старіння, яке ґрунтується на використанні законів кінетики хімічних реакцій стосовно до ізоляційних матеріалів. Для опису хімічних реакцій використовується спрощений аналітичний вираз Вант-Гоффа – Арреніуса. В роботі ставиться акцент саме на вплив хімічного і фізичного старіння матеріалів ізоляції для електричних машин. Даний метод дає можливість оцінки залишкового ресурсу ізоляційних матеріалів електричних машин в умовах експлуатації.

В роботі [20] пропонується удосконалення формули Монтзінгера для визначення відносного зношення ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, враховуючи вологість твердої ізоляції, наявність кислот в маслі, підвищену концентрацію кисню в маслі та температуру навколишнього середовища. Показник, температура навколишнього середовища, враховує розміщення трансформатора, коли він або знаходиться під безпосереднім потраплянням на нього сонячних променів, або ж коли на нього діють інші джерела теплової енергії.

В роботі [21] наведено реалізацію структури пристрою для контролю технічного стану силового масляного трансформатора з використанням найбільш суттєвих факторів впливу на залишковий ресурс ізоляції: струм в обмотці трансформатора, напругу на обмотках, температуру найбільш нагрітої точки верхніх шарів масла, температуру навколишнього середовища.

Здійснивши аналіз причин зменшення ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, можна стверджувати, що основними з них є вологість твердої ізоляції, наявність кислот в маслі, підвищена концентрація кисню в маслі та температура навколишнього середовища. Останній показник враховує ту особливість розміщення трансформатора, коли він або знаходиться під безпосереднім потраплянням на нього сонячних променів, або ж коли на нього діють інші джерела теплової енергії. Як перша, так і друга причини призводить до додаткового нагрівання баку трансформатора, а як наслідок – і масла в баку, і самих обмоток.

Також потрібно згадати про оцінку ресурсу целюлозної ізоляції під час експлуатації силових трансформаторів. Цим питанням займалися багато вітчизняних і зарубіжних вчених. Добре відомо, що ресурс целюлозної ізоляції характеризується її механічною міцністю, яка відповідно визначається коефіцієнтом полімеризації. Для нової ізоляції значення ступеню полімеризації рівне 1200 одиниць. Зменшення значення ступеню полімеризації до 250 одиниць свідчить про вичерпання ресурсу ізоляції та необхідність виводу силового трансформатора з експлуатації.

Процес старіння ізоляції трансформатора пришвидшується при вищій температурі в присутності кисню та вологи. Оцінку строку служби ізоляції трансформатора можна визначити за допомогою різних діагностичних методів.

Так в роботі [22] розроблена математична модель для визначення залишкового ресурсу ізоляції силових трансформаторів на основі зв'язку ступеню полімеризації та концентрації фуранів. Модель в подальшому дозволяє розрахувати залишковий ресурс силового трансформатора.

Для визначення ступеня полімеризації і відповідно ступеня старіння ізоляції потрібні зразки паперової ізоляції працюючого силового масляного трансформатора. В роботах [23-28] було розроблено методи опосередкованої оцінки стану старіння твердої ізоляції за допомогою хімічних маркерів у трансформаторному маслі, які пов'язані зі старінням паперової ізоляції. Дані маркери включають оксиди вуглецю, сполуки фурану, етанол та вологу в трансформаторному маслі. Ці маркери разом з показником кислотності та міжфазною напругою дозволяють визначити ступінь старіння ізоляції трансформатора. Проте подібні підходи потребують удосконалення через недостатню точність.

Для надійної роботи силових масляних трансформаторів необхідно, щоб технологічний процес виготовлення і вводу в експлатцію відповідав усім нормам і стандартам. Так в роботі [29] виявлено факт експоненційного зниження ступеня полімеризації паперової ізоляції. З'ясувалось, що ступінь полімеризації паперової ізоляції після вводу в експлатацію силового масляного трансформатора значно менший від заявленого.

В роботі [30] розроблена модель прогнозування, яка враховує і оцінює окис вуглецю, двоокис вуглецю, напругу пробою, міжфазну напругу, кислотність, вологість, колір олії та 2-фурфуральдегід. Результатом моделі є ступінь полімеризації, яка розділена на 5 класів для того, щоб визначити нормальну швидкість старіння ізоляційного паперу, прискорену швидкість старіння, зону ризику надмірного старіння, високий рівень старіння. ризик

відмови та закінчення очікуваного терміну служби відповідно. Отримавши ці результати визначається залишковий термін служби ізоляції силового масляного трансформатора.

Зокрема в роботі [31] показано, що процеси деградації целюлозної ізоляції обмоток трансформатора призводять до зниження міцності паперу та розвитку дегідратації. В роботі описано, як з рівня полімеризації паперової ізоляції обмоток, що викликає виникнення виткових замикань при зниженні механічної міцності паперу та місцевого підвищення концентрації вологи, можна зробити висновок про рівень роботоздатності ізоляції обмоток трансформатора і таким чином відслідковувати спрацювання робочого ресурсу ізоляції [32].

Слід зазначити, що останнім часом для продовження терміну експлуатації трансформатора запроваджується підхід, який передбачає регенерацію целюлозної ізоляції обмоток шляхом її відмивання із застосуванням поверхнево-активних речовин [33]. Аналогічним чином в закордонній практиці застосовують періодичні очищення трансформаторного масла від кислих та окислених продуктів старіння паперово-масляної ізоляції, а також використовують спеціальні регенераційні масла для очищення ізоляції від продуктів старіння, що прискорюють шлакоутворення та дегідратацію целюлозної ізоляції обмоток [34, 35].

Широко застосовується в теперішній час хроматографічний аналіз розчинених в трансформаторному маслі газів, який є ефективним засобом діагностування силових трансформаторів [36], але через високу чутливість методу можуть бути хибні оцінки діагностування при наявності внутрішніх термічних дефектів трансформатора, наприклад, пошкодження ізоляції остова трансформатора, пошкодження магнітопроводу тощо

Способи оцінки фактичного ресурсу целюлозної ізоляції за рівнем ступеню полімеризації можна поділити на прямі та непрямі. Прямі методи засновані на лабораторному визначенні ступеню полімеризації зразків целюлозної ізоляції, тобто шляхом відбору їх з місця, де найбільша



температура [37–41]. Застосування цих методів ускладнено необхідністю проведення фактично капітального ремонту трансформатора з метою відбору зразка целюлози.

До непрямих відносять методи, засновані на оцінці вмісту в трансформаторному маслі оксидів вуглецю та похідних фуранів [42–45]. Звичайно, ці методи також мають недоліки, які ускладнюють їх практичне застосування [46]. До непрямих також можна віднести розрахункові аналітичні методи та моделі, які дозволяють виконувати розрахунок фактичного ресурсу та скорочення строку служби целюлозної ізоляції впродовж експлуатації, базуючись на інформації з первинних датчиків, що встановлені в системі неперервного контролю. Тут мова іде про моніторинг температури найбільш нагрітої точки (температури ННТ), рівень вологості трансформаторного масла та ін.

Як відомо, витрата ресурсу целюлозної ізоляції є комплексним складним процесом, який містить в собі деструкцію ізоляції в результаті теплового старіння, деструкцію ізоляції в результаті гідролізу та деструкцію ізоляції в результаті окислення [47–49]. Важливими факторами прискореного старіння є: підвищений вміст вологи в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі та підвищена температура, наявність кисню у трансформаторному маслі і продуктів старіння масла. У роботі [50] представлена загальна модель старіння целюлозної ізоляції (рисунок 1.1).

Досить добре вивчено процес впливу підвищеної температури на швидкість старіння целюлозної ізоляції. Час до досягнення ізоляцією критичного значення описується законом Арреніуса, зокрема у роботах [51, 52].

Теплове старіння – строк служби ізоляції до критичної деструкції паперу і деградації його механічних властивостей і цей процес має незворотний характер [53, 54].

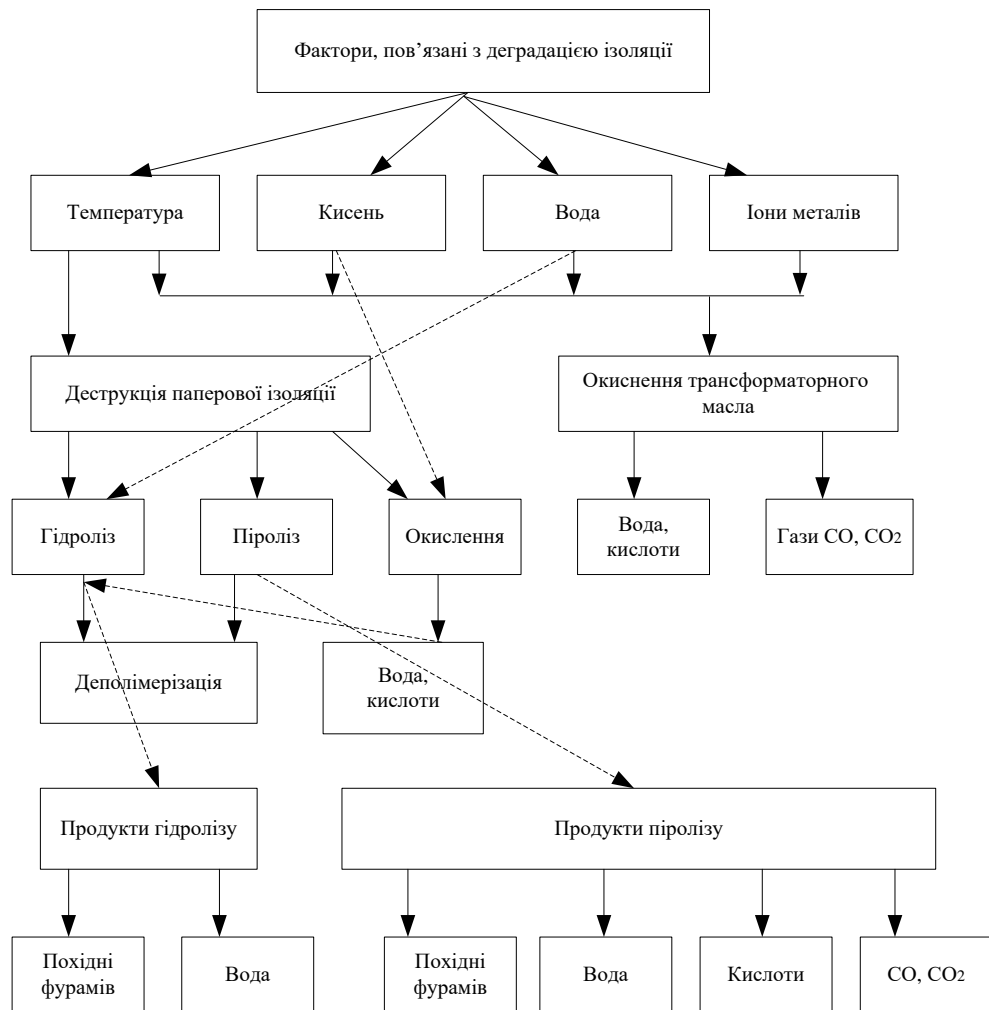


Рисунок 1.1 – Загальноприйнята модель старіння целюлозної ізоляції

Слід зазначити, що на сьогодні сучасні силові трансформатори типу ТМЗ мають захист трансформаторного масла від впливу хімічно агресивного середовища шляхом застосування азотної подушки.

У роботі [55] наведена модифікована формули Арреніуса. За допомогою модифікованої формули Арреніуса можна, користуючись результатами моніторингу температури найбільш нагрітої точки (ННТ), змоделювати зменшення значення ступеню полімеризації в процесі експлуатації трансформатора.

Уточнення формули інтегралу старіння шляхом врахування впливу на швидкість старіння інших експлуатаційних факторів – ступеню зволоженості целюлозної ізоляції і ступеню окислення трансформаторного масла,

запропоновано у роботах [56, 57].

Залишкова волога в елементах товстої структури ізоляції, проникнення вологи з атмосфери, розкладання целюлози та масла в результаті старіння [58, 59], є джерелами вологи в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі. Наявність води в целюлозній ізоляції впливає на швидкість її старіння. При вологовмісті 2 % від маси паперу швидкість старіння збільшується в 6–16 разів, а при 4 % – в 12–45 разів, ніж при вологості 0,3 %. Слід зауважити, що, відповідно до стандарту, втрати 3–4 % від загальної маси целюлозної ізоляції є максимально допустимими.

Потрібно зауважити, що наявність вологи в системі, целюлозна ізоляція – трансформаторне масло, впливає на зниження електричної міцності масла. При низьких температурах внаслідок підвищення відносної вологості масла можливе виникнення пробою масляного каналу між котушками при робочій напрузі [60].

Попередні результати існуючих досліджень показують, що умови для критичного зниження ступеня електричної міцності виникають лише при сильній зволоженості масла. Відзначені в роботі [61] негативні фактори, які впливають на целюлозну ізоляцію при сильному зволоженні: посилення корозійної дії масла на металеві частини трансформатора, прискорення окислення масла, погіршення механічних властивостей масла з ростом температури.

Методи тепловізійного контролю трансформаторного обладнання відносно не нові, хоч масове виробництво приладів тепловізійного контролю – тепловізорів - розвинулось не так давно. Принцип роботи тепловізора заснований на здатності вловлювати інфрачервоне випромінювання від досліджуваних об'єктів і визначати температуру або перетворювати його у візуальну картину розподілення теплових полів на поверхні об'єктів. Отримане зображення називається термограмою й може бути подане як кольоровою, так і чорно-білою, або інвертованою. Оператор бачить термограму у видопошукачу або на моніторі комп'ютера та може визначити

температуру в будь-якій точці об'єкта. На практиці іноді навіть невелика різниця в температурах на одному й тому ж об'єкті свідчить про недоліки (недостатній рівень масла у ввіді трансформатора чи погано затягнутий контакт), які можуть серйозно зашкодити виробництву.

В роботі [62] описано застосування тепловізійного контролю високовольтного силового електрообладнання. В результаті аналізу виявлено, що більшість дефектів має місце із-за неякісних контактних з'єднань.

Під час тепловізійного дослідження високовольтних маслонаповнених ввідів можна зробити висновок, що такий підхід дозволяє виявити пошкодження, що розвиваються, в той час як типовий електричний та хроматографічний методи контролю не показують точних показників відхилення параметрів за допустимі межі [63, 64].

З проаналізованих робіт випливає висновок, що більша частина як підходів так і реалізованих засобів діагностування силових масляних трансформаторів непридатні для застосування при неперервному оцінюванні технічного стану трансформаторів. Також відомі підходи не дають можливість відслідковувати короткотривалі збурення. Існуючі технічні засоби та використовувані підходи, що реалізуються на працюючому обладнанні, не перекривають весь спектр проблем, що виникають в процесі роботи силових трансформаторів.

Так, в роботах [65, 66] звертається увага на необхідність більш досконалішого визначення залишкового ресурсу силових трансформаторів, які працюють в режимі перевантаження. Звичайно, що застосовуючи інші підходи і розроблюючи математичні моделі, можливо розв'язувати інші актуальні задачі при діагностуванні силових масляних трансформаторів.

## **1.2 Аналіз існуючих засобів оцінювання ступеня зносу ізоляції силового трансформатора**

Не менш важливим є аналіз існуючих засобів, які уже використовуються

на практиці. Існує велика кількість різноманітних засобів оцінки ступеня зносу ізоляції, проте кожний метод має різну точність. Деякі відомі засоби вважаються застарілими.

Частина засобів пройшли модернізацію і оновлення зокрема оновили свою апаратну базу і можливості швидкого обрахунку результату.

На сьогодні широко застосовується різного роду мікроконтролери для швидкого аналізу даних. В роботі [67] представлено пристрій, який на основі вимірних значень напруги, струму, температури верхніх шарів трансформаторного масла та температури навколишнього середовища обчислює залишковий робочий ресурс обмоток. Мікропроцесорний пристрій реалізовано на базі мікроконтролера AT90S8515 фірми Atmel. Суть математичної моделі полягають у підвищенні точності визначення реальної температури ізоляції обмоток силового трансформатора, що в свою чергу дозволяє підвищити точність у задачі визначення їх залишкового робочого ресурсу.

Відомий патент [68], який передбачає визначення рівня спрацювання обмоток силового трансформатора, працюючого як в нормальному режимі, так і в режимі перевантаження, за деякий проміжок часу. Даний патент представляє собою пристрій для контролю рівня спрацювання ресурсу, оперуючись на показники датчиків і величини струму, що контролюється.

Значна увага в плані контролю зміни ресурс ізоляції обмоток силового трансформатора приділяється питанням визначенням температури масла в баку. В роботах [69 – 74] пропонуються підходи, які дозволяють визначати залишковий робочий ресурс обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі роботи за струмом навантаження і найвищою температурою обмоток та в режимі перевантаження за потужністю перевантаження, потужністю, яка передувала режиму перевантаження, і температурою навколишнього середовища.

Пристрій для вимірювання спрацювання силового трансформатора з врахуванням спрацювання робочого ресурсу обмоток шляхом вимірювання

температури найбільшої нагрітої точки обмоток та рівня завантаження трансформатора представлено в роботі [75]. Також роботі враховано визначення залишкового робочого ресурсу високовольтних вводів за опосередкованими прогнозуванням рівня інтенсивності часткових розрядів, що призводять до витрати ресурсу ізоляції.

В роботі [76] представлено пристрій, який дозволяє визначати залишковий робочий ресурс обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі роботи за струмом навантаження і найвищою температурою обмоток та в режимі перевантаження за потужністю перевантаження, потужністю, яка передувала режиму перевантаження, і температурою навколишнього середовища. Спрацювання робочого ресурсу представляється у вигляді різної кількості імпульсів за однакові проміжки часу в залежності від інтенсивності завантаження силового трансформатора.

Структурна схема пристрою для діагностування силового трансформатора зображена на рисунку 1.2.

На схемі: 1 – датчик температури; 2, 3 – датчики напруги та струму відповідно; 4 – перетворювач температури в постійну напругу; 5, 6, 7 – нормуючі перетворювачі; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – блок обчислення потужності; 10, 11 – перший та другий перетворювачі змінної напруги в постійну; 12 – блок задання потужності; 13 – аналого-цифровий перетворювач; 14 – компаратор; 15 – генератор імпульсів; 16 – логічний елемент І; 17 – регістр; 18 – генератор імпульсів; 19 – функціональний перетворювач; 20 – керований дільник частоти; 21 – логічний елемент І; 22 – логічний елемент ІІ; 23 – логічний елемент І; 24 – логічний елемент АБО; 25 – лічильник імпульсів; 26 – датчик температури; 27 – генератор імпульсів; 28 – перетворювач температури в постійну напругу; 29 – логічний елемент І; 30 – нормуючий перетворювач; 31 – суматор; 32 – лічильник імпульсів; 33 – функціональний перетворювач; 34 – цифро-аналоговий перетворювач; 35 – компаратор; 36 – RS-тригер; 37 – формувач імпульсів.

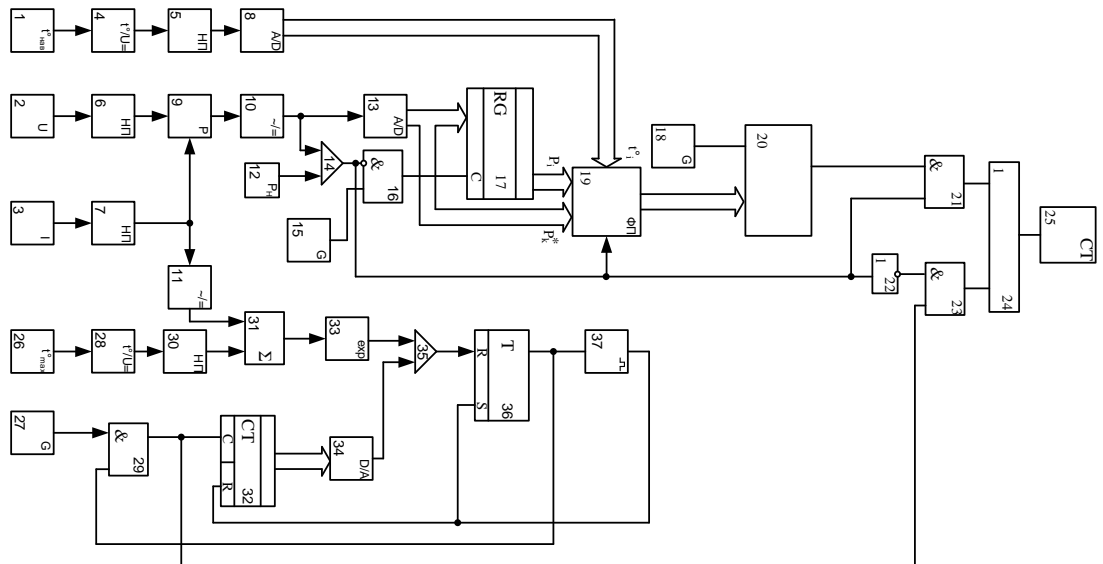


Рисунок 1.2 – Структурна схема пристрою для діагностування обмоток силового масляного трансформатора

Для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора датчики пристрою розподілені по об'єкту таким чином: датчик температури 26 установлений на трансформаторі та призначений для вимірювання температури верхніх шарів трансформаторного масла. Датчик струму 3 установлений в колі вторинної обмотки силового трансформатора. Ці два датчики дозволяють здійснити оцінку робочого ресурсу обмоток силового трансформатора в нормальному режимі його функціонування. Датчик температури 1 розташований біля силового трансформатора і дозволяє контролювати температуру навколишнього середовища. Датчик напруги 2 призначений для вимірювання значення напруги силового трансформатора. За допомогою датчиків 1, 2 та 3 разом з блоком обмеження можна контролювати спрацювання ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора, який працює в режимі перевантаження.

Для більш надійної роботи силових масляних трансформаторів, необхідно безперервно враховувати стан ізоляції обмоток, при цьому паралельно відслідковуючи спрацювання ресурсу ізоляції обмоток силового

трансформатора, який працює в режимі перевантаження. В ряді робіт [77 - 80] запропоновано підхід, який дозволяє враховувати зазначене.

Аналізуючи наукові роботи у пошуку внутрішніх дефектів трансформаторів та знаходження їх місця за допомогою тепловізорів, можна сказати, що цей напрям для розвитку має широкі перспективи. Результати тепловізійного обстеження трансформаторів на основі поділяються на три групи.

До першої відносяться випадки, коли за допомогою тепловізора вдається знайти чітко помітні локальні нагріви на стінках баку трансформатора. Розкриття вказує, що стається це із-за пошкодження ізоляції шпильок, обриву шин заземлення та ряду інших причин.

Так в роботах [81, 82] продемонстровано, що за допомогою тепловізора вдалося виявляти чітко виражені локальні нагрівання стінок бака трансформатора, а це свідчить про локальне пошкодження ізоляції, яке можна виявити лише при розбиранні конструкції.

Друга група об'єднує результати обстеження випадків, коли навіть при діагностуванні термічного дефекту високої температури (понад  $700^{\circ}\text{C}$ ) не вдається знайти локальний нагрів на стінці баку трансформатора. Це пояснюється відсутністю проекції точки нагріву на стінку баку. На жаль, на сьогодні не існує методів однозначного визначення таких дефектів.

Третя група – це дефекти, зумовлені конструктивними особливостями трансформаторів.

Тепловізійне обстеження використовується для виявлення локальних нагрівів баків трансформаторів вже при появі газів, характерних для нагріву масла і ізоляції. Таке обстеження необхідно при діагностуванні термічних пошкоджень. Тепловізійне обстеження трансформаторів ефективно доповнює діагностику ультразвуком, а також традиційні методи електричних випробувань трансформаторів.

Доцільним є тепловізійне діагностування систем охолодження силових трансформаторів. Саме такий підхід [83–85], дозволяє виявляти на працюючому обладнанні неефективність охолодження із-за дефекта



циркуляційного маслonaсоса, забруднення ребер радіаторів, внаслідок чого температура підвищується, та забруднення фільтрів і патрубків, що призводить до перекоосу в теплових полях систем охолодження.

Для здійснення тепловізійних вимірювань застосовуються тепловізори як відомих зарубіжних виробництв (AGEMA, LAND, Flir Systems), так і виробників країн СНД (ЗАТ “Спектр”, НПВ “Оріон”, ЦНТІ “Електрон”, Даркос та інші) [86].

Активно використовуються методи тепловізійного діагностування [87, 88], суть яких полягає в тому, щоб періодично визначати області підвищеної температури, в результаті чого можна зробити висновок про виникнення та розвинення місця можливого пошкодження.

На сьогодні тепловізійна діагностика трансформатора набуває популярності не лише в Україні а й за кордоном. Так, в роботі [89] розроблена методика, яка дозволяє локалізувати місця несправностей, а також дає можливість використовувати даний підхід для діагностики та виявлення порушень якості матеріалу ізоляції та інших аномалій під час роботи обладнання.

Також в роботах [90, 91] представлені результати термографічного моніторингу зразкових силових трансформаторів. Було досліджено серію термограм, які відображають місця найбільшого нагріву, що дає можливість прогнозувати стан електричної ізоляції трансформатора, площу ділянки перегріву, а також вплив навколишнього середовища. Результат дослідження вказує на неефективне охолодження трансформаторів із погіршеною електроізоляцією, особливо в літній сезон.

Інші реалізації тепловізійного діагностування представлені в робота [92-93], проте при описаному підході можливо виявлення лише пошкоджень, що розвиваються, або на ранній стадії, або в перед аварійному стані експлуатації і зовсім не дозволяють прогнозувати вичерпання робочого ресурсу ізоляції або вузлів трансформатора в процесі експлуатації під дією різноманітних чинників.

З проведеного аналізу можна зробити висновок, що існуючі методи і засоби діагностування силових трансформаторів не дозволяють відобразити ступінь спрацювання ізоляції при короткотривалих стрибках навантаження і не дозволяють спрогнозувати витрачання залишкового ресурсу ізоляції.

### **1.3 Висновки та постановка задачі дослідження**

Проведено огляд методів і засобів діагностування потужних силових трансформаторів, зокрема увага була сконцентрована на обмотках силових масляних трансформаторів і показано, що:

1. Існуючі підходи та засоби не реалізують математичну модель, яка враховує фактор впливу на силовий масляний трансформатор, що працює в режимі короткочасних стрибків навантаження, а отже не дозволяють ці фактори враховувати.

2. Існуючі підходи і засоби не передбачають діагностування в процесі роботи вплив короткочасних стрибків навантаження на обмотки силових масляних трансформаторів. Доцільно розробити вказаний підхід для силового масляного трансформатора, з урахуванням того, щоб підхід можна було адаптувати під різні силові масляні трансформатори, наприклад для різною кількості витків в обмотках.

В зв'язку з цим розробка більш ефективного методу для вирішення даної задачі є актуальною.

Операючись на системний підхід для вирішення задачі створення діагностичного пристрою для виявлення короткочасних стрибків навантаження і їх вплив на ступінь старіння ізоляції обмотки, можна запропонувати такий алгоритм:

- на основі існуючих засобів та методів діагностування силових масляних трансформаторів розробити математичну модель пристрою, яка дозволить вимірювати ступень старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, при короткочасних стрибка навантаження. Для цього

необхідно попередньо розробити математичну модель нагріву обмотки трансформатора за короткочасний стрибок навантаження.

- розробити математичну модель яка дозволяє описати процес відводу тепла від обмотки трансформатора за рахунок циркуляції масла в баку трансформатора

- Синтезувати структуру пристрою для діагностування силового масляного трансформатора, що працює в режимі короткочасних стрибків навантаження

- Здійснити мікропроцесорну реалізацію синтезованого пристрою діагностування силового масляного трансформатора

- Оцінити похибку синтезованого пристрою для діагностування силового масляного трансформатора.

Реалізацію вищезазначених етапів алгоритму розв'язання поставленої задачі розглянуто в усіх наступних розділах дисертації.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Математичне моделювання є одним з найбільш розповсюджених методів аналізу, синтезу та оптимізації складних систем.

Для створення автоматизованих систем діагностування силового масляного трансформатора використання математичного моделювання дозволяє вибрати найбільш доцільні і раціональні структури на початкових етапах їх створення, що тим самим знижує витрати матеріальних ресурсів. При розробці складних динамічних систем, зокрема як системи діагностування силового масляного трансформатора, необхідно враховувати різноманітність їх структур і можливість використання різних математичних моделей для їх опису. Очевидно, в межах однієї математичної моделі складно врахувати усі фактори які мають вплив на реальний об'єкт моделювання, які характеризують процеси моделювання, тому доцільно використовувати сукупність математичних моделей, що описують комбінації окремих факторів. Підкреслимо також, що в межах однієї роботи неможливо розробити математичні моделі, які дозволяли б діагностувати всі елементи силового масляного трансформатора. Одним із основних елементів силового масляного трансформатора є його обмотки, від надійності роботи яких залежить рівень безвідмовності роботи трансформатора в цілому, який в свою чергу забезпечує роботу енергетичної системи в цілому. Тому до надійності силових масляних трансформаторів висуваються підвищені вимоги.

## **2.1 Математична модель для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі**

Відомо, що силові трансформатори відносяться до основного електрообладнання електричних мереж та систем, за допомогою яких здійснюється передача потоків електроенергії [94].

Потужні силові трансформатори відносяться до найцінніших активів в системі електричних мереж. Це обумовлює те, що до таких трансформаторів прикута значна увага для визначення операційного ресурсу. Аварійне відключення силових трансформаторів впливає на стабільність мережі та призводить до значних фінансових витрат для енергетичних підприємств і для електричної мережі в цілому.

Під час роботи силового трансформатора частина електричної енергії перетворюється в тепло. І хоча ця частина енергії досить мала, порівняно із загальною електричною потужністю та потоками електричної енергії, що передаються через трансформатор, екстремальні режими, що виникають в силових трансформаторах, спричиняють значне підвищення температури, яка впливає на вичерпання робочого ресурсу ізоляції обмоток. Тому актуальною є задача визначати як температура обмоток змінюється в процесі експлуатації з врахуванням аварійних короточасних режимів роботи.

Відомий ряд методів та засобів, які дозволяють оцінювати процес старіння ізоляції обмоток силових трансформаторів в процесі їх експлуатації [95, 96]. Однак зазначені підходи орієнтовані на відслідковування процесів, що змінюються повільно в часі.

В той же час часто силові трансформатори працюють в режимах короткотривалого підвищеного навантаження або перевантаження, які можливо оцінити за динамічними режимами їх роботи з певним запізненням після закінчення відповідного процесу. Зазначимо, що вказані режими роботи вносять суттєву корекцію у процес визначення залишкового робочого ресурсу

ізоляції силових трансформаторів.

Відомий підхід, яким передбачається визначення температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток, за яким можливо оцінити процес теплового старіння обмоток силового трансформатора.

Процедура розрахунку температури найбільш нагрітої точки наведена в Міжнародних стандартах [97, 98]. В роботі [99] наведений алгоритм для розрахунку температури найбільш нагрітої точки навантаженого трансформатора з використанням експериментальних даних, отриманих за короткий час нагрівання обмоток. Вказаний спосіб визначення найбільш нагрітої точки в силовому трансформаторі забезпечується визначенням диференціалу тепловіддачі, в основі розрахунків якого обмотка розглядається як циліндр без урахування залежності температури від просторових координат [100].

На сьогодні не існує методу, який дозволить опосередкованими вимірюваннями без використання різного роду сенсорів визначити, яка кількість тепла виділилась на краю обмотки і якою є температура обмотки.

Математична модель представляє собою метод для аналізу температури на краю обмотки, опираючись на процеси теплопередачі прямокутного провідника з внутрішнім джерелом тепла, який повністю омивається рідиною. Джерелом внутрішнього тепла виступає електричний струм, який протікає по провіднику. Даний підхід вимагає розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, що використовуються у енергетичному (тепловому) рівнянні. Математична модель дозволяє визначити температуру при довільній зміні струму і розташуванню витків по відношенню до висоти бака.

Відомо, що структура обмотки трансформатора є складною і не відповідає жодній відомій геометрії в строгому розумінні. За загальних умов обмотки трансформатора можна вважати циліндричними за формою, отже, шари витків обмоток є набором вкладених один в одного циліндрів [101]. Припустимо, що тепло в обмотці трансформатора генерується з постійною швидкістю і масло за рахунок циркуляції відводить тепло від обмоток до

охолоджуючого баку. Як відомо [94], температура на різних рівнях баку трансформатора відрізняється, а тому необхідно враховувати, що температура буде залежати від просторової змінної по висоті обмотки. Якщо розглядати один зріз обмотки товщиною в один виток як пластину, тоді це зводить задачу до визначення температури однієї пластини, а потім і набору пластин, що відображають всю обмотку по висоті. Для спрощення розрахунків кривизною провідника знехтуємо. Діелектричні втрати в ізоляції вважатимемо малими порівняно з втратами в алюмінієвому провіднику. Поверхню пластин (зрізу провідників обмотки) вважатимемо гладкою. Прийmemo також, що тепло із обмотки трансформатора передається лише радіально в охолоджуюче середовище, не будемо враховувати передачу тепла від сусідньої обмотки.

При побудові моделі переносу тепла в таких випадках важливо знати інтенсивність об'ємного виділення теплоти, яке кількісно характеризується потужністю джерела теплоти.

Зауважимо, що для розрахунків розглядаємо силовий масляний трансформатор з вторинною обмоткою, виконаною з прямокутного алюмінієвого провідника.

Розглянемо набір пластин (зрізів провідників обмотки, в горизонтальній площині кожного зрізу розташовано чотири провідники), товщина яких  $2\delta$ . Графічне зображення зрізу пластини як елемента зрізу з набору пластин представлено на рисунку 2.1

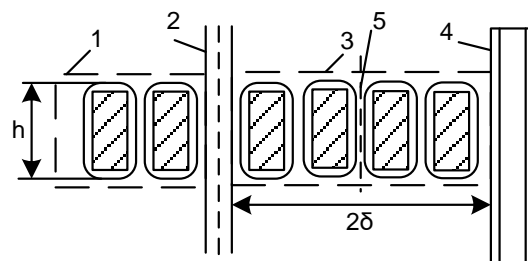


Рисунок 2.1 – Зріз набору провідників в обмотці трансформатора:

1 – обмотка високої напруги, 2 – ізоляційний канал між обмотками, 3 – обмотка низької напруги, 4 – магнітопровід, 5 – центр обмотки низької напруги,  $h$  – поверхня омивання, м.

Зауважимо, що джерело теплоти рівномірно розподілено по об'єму провідника і є сталою величиною. Задані коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  та температура трансформаторного масла  $T_m$ , що омиває пластини. Вважаємо, що  $\alpha = \text{const}$  і  $T_m = \text{const}$  [102].

Для стаціонарних процесів теплопровідності диференціальне рівняння теплопровідності при наявності джерела теплоти має вигляд [102]:

$$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda} = 0,$$

де  $q_v$  — об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти;  $\text{Вт/м}^3$ ,  $\lambda$  — теплопровідність матеріалу,  $\text{Вт/м}$ ;  $T$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\nabla$  — векторний диференціальний оператор першого порядку, компоненти якого є частковими похідними за координатами.

Оскільки наш випадок відноситься до нестаціонарних процесів теплопровідності, диференціальне рівняння для нашого випадку рівняння приймає вид [102]:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (2.1)$$

де  $x$  — Декартова координата.

Введемо граничні умови. При  $x = \pm \delta$  за виразом (2.1) будемо мати

$$\pm \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=\pm\delta} = \alpha (T_c - T_m),$$

де  $T_c$  — температура зовнішньої стінки провідника,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  — товщина пластини,  $\text{м}$ ;  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі;  $T_m$  — температура трансформаторного масла,  $^{\circ}\text{C}$

Оскільки граничні умови для обох сторін однакові, приймемо, що температурне поле в середині пластини симетричне відносно площини  $x = 0$ .



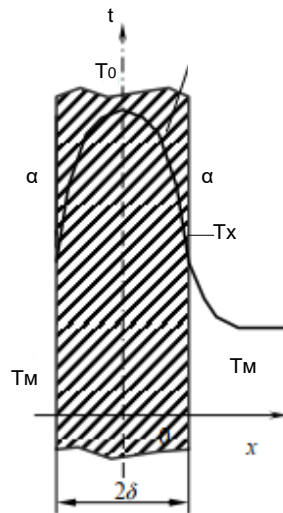


Рисунок 2.2 – Теплопровідність плоскої пластини за наявності внутрішніх джерел теплоти:  $T_x$  – шукана температури, що з'явилася в результаті впливу внутрішніх джерел теплоти

Згідно рисунку 2.2 будемо розглядати лише одну половину пластини (наприклад, праву) і запишемо для неї граничні умови у вигляді:

$$\begin{cases} x=0; \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = 0; \\ x=\delta; -\lambda\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=\delta} = \alpha(T_c - T_M). \end{cases} \quad (2.2)$$

Після інтегрування (2.1) отримаємо:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-q_v x}{\lambda} + C_1, \quad (2.3)$$

$$T = \frac{-q_v x^2}{2\lambda} + C_1 x + C_2. \quad (2.4)$$

Сталі інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  визначаються з граничних умов (2.2). При  $x = 0$  з рівняння (2.3) отримуємо  $C_1 = 0$ ;

З формули (2.3) отримаємо

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=\delta} = \frac{-q_v \delta}{\lambda}.$$

Тоді  $t_c$  – температура стінки:

$$t_c = T_M + \frac{q_v \delta}{\alpha}. \quad (2.5)$$

Підставимо вираз (2.5) у рівняння (2.4) при  $x = \delta$ , отримаємо:

$$C_2 = T_M + \frac{q_v \delta}{\alpha} + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda}.$$

Підставимо значення сталих інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  у вираз (2.4) і знайдемо рівняння температурного поля:

$$T_x = T_M + \frac{q_v \delta}{\alpha} + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} \left[ 1 - \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (2.6)$$

Для визначення температури стінки провідника обмотки необхідно визначити  $q_v$  (Вт/м<sup>3</sup>) за формулою:

$$q_v = \frac{Q_v}{V}, \quad (2.7)$$

де  $Q_v$  – тепловиділення у провіднику довжиною один метр, Дж;  $V$  – об'єм провідника, м<sup>3</sup>.

Для більш точного розрахунку згідно формули (2.5) потрібно враховувати еквівалентну теплопровідність, яка знаходиться з термічного опору  $R_T$  [102]:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2.8)$$

де  $\delta$  — товщина всього шару матеріалу, м.

Еквівалентна теплопровідність матеріалу знаходиться по формулі [102]:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{в}}}{R_{\text{т}}}, \quad (2.9)$$

де  $\delta_{\text{в}}$  — товщина всього шару матеріалу, з урахуванням товщини металу, ізоляції і масляних каналів, м.

На рисунку 2.3 зображено набір провідників обмотки трансформатора, вид зверху, як набір плоских пластин зі знехтуваним кривизни обмотки.

Запропонований підхід розгляду набору провідників як однорідних пластин узгоджується з математичною моделлю і не впливає на теплопровідність.

Для коректної оцінки температури на краю обмотки необхідно враховувати природну циркуляцію масла у баку трансформатора. Для цього необхідно враховувати тепловіддачу при вимушеному повздовжньому омиванню плоскої поверхні. Підкреслимо, що циркуляція впливає на температуру рідини, а тому наступним етапом буде визначення показника тепловіддачі.

Розглянемо випадок, коли циркуляція рідини здійснюється природнім шляхом. При цьому повздовжнє омивання є єдиною конвекцією тепла і виступає як вимушене повздовжнє омивання плоскої поверхні [102].

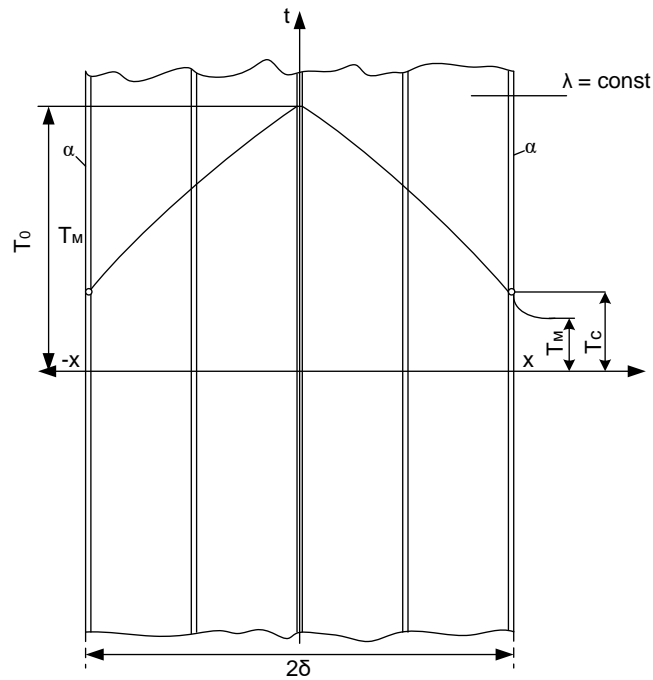


Рисунок 2.3 – Розподіл температури чотирьох плоских пластин при наявності внутрішнього джерела теплоти:  $T_0$  – температура на осі  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  – температура стінки,  $^{\circ}\text{C}$

Розглянемо процес омивання обмотки трансформатора для визначення математичної моделі, завдяки якій отримаємо значення коефіцієнта  $\alpha$ , який необхідний для застосування у формулі (2.5). Для спрощення представимо циліндричну поверхню плоскою, що омивається потоком охолоджувальної рідини, швидкість і температура сталі і позначені відповідно  $w_0$  і  $T_M$ . Приймаємо, що температура провідника під дією потоку трансформаторного масла, який направлений вздовж бокової поверхні зрізу провідника, не змінюється в часі, внутрішні джерела теплоти в трансформаторному маслі відсутні, теплотою тертя нехтуємо.

Для того, щоб визначити тепловіддачу, необхідно знати розподіл швидкості трансформаторного масла. В роботі [103] здійснено моделювання швидкості циркуляції трансформаторного масла в баку. Тому приймаємо швидкість циркуляції масла в баку, яка є сталою та відповідає природній швидкості циркуляція масла.

Тоді згідно [102] коефіцієнт тепловіддачі має вигляд:

$$\alpha = \frac{\lambda}{V_0} \left( \frac{dV}{dy} \right)_{y=0} = \frac{3}{2} \times \frac{\lambda}{k}, \quad (2.10)$$

де  $k$  — товщина теплового шару, м;  $V_0$  — температурний напір,  $^{\circ}\text{C}$ .

Згідно [102] товщина теплового шару:

$$k = \frac{4.64 \cdot h}{\sqrt{\text{Re}_x}^3 \sqrt{\text{Pr}}}, \quad (2.11)$$

де  $\text{Pr}$  — критерій Прандтля для рідини, визначений за температурою рідини;  $\text{Re}$  — число Рейнольдса, безрозмірна величина характеризує відношення інерційних сил до сил в'язкого тертя у в'язких рідинах і газах;  $h$  — висота поверхні омивання, м.

Згідно [102] число Рейнольдса:

$$\text{Re}_x = \frac{w_0 \cdot h}{\nu}, \quad (2.12)$$

де  $w_0$  — швидкість циркуляції рідини, м/с;  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Рівняння (2.10) приведемо у безрозмірну форму. Для цього перемножимо ліву і праву частину на  $x/\lambda$  і підставимо значення  $k$  відповідно до (2.11), отримаємо:

$$\text{Nu}_h = 0.33 \sqrt{\text{Re}_h}^3 \cdot \sqrt{\text{Pr}}. \quad (2.13)$$

Тоді

$$\text{Nu}_h = \frac{ah}{\lambda} = \frac{al}{\lambda} \cdot \frac{h}{l} = \text{Nu}_l \text{H}, \quad (2.14)$$

$$\text{Re}_h = \frac{w_0 h}{\nu} = \frac{w_0 l}{\nu} \cdot \frac{h}{l} = \text{Re}_l \text{H}, \quad (2.15)$$

де  $l$  — довжина провідника вздовж потоку, м;  $H$  — безрозмірна довжина  $h/l$ .

Формула для визначення критерія Прандтля для рідини має вигляд [102]:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}. \quad (2.16)$$

Рівняння (2.13) запишемо у вигляді:

$$\text{Nu}_1 = 0.33 H^{0.5} \text{Re}_1^{0.5} \text{Pr}^{1/3}. \quad (2.17)$$

Із (2.17) витікає, що:

$$\text{Nu}_1 = \alpha H^{-0.5} \text{ або } \alpha = c h^{-0.5}. \quad (2.18)$$

Величина  $\alpha = 0.33 \text{Re}_h^{0.5} \text{Pr}^{1/3}$  і  $c = \alpha h^{-0.5}$  містять коефіцієнт пропорційності 0.33, швидкість  $w_0$ , довжину пластини  $l$  і фізичні параметри  $\lambda$ ,  $\nu$  і  $\alpha$  від  $h$  не залежать [102].

Відповідно з (2.18) при  $h = 0$  значення коефіцієнта тепловіддачі безкінечно велике. При збільшенні  $h$  він приймає кінцеве значення, яке зменшується. Такий характер зміни  $\alpha$  пояснюється тим, що температура потоку  $\Theta_0 = T_m - T_x$  не змінюється вздовж поверхні обмотки трансформатора, в той час як температурний градієнт на стінці безперервно зменшується зі збільшенням  $h$  [102].

Важливою складовою дослідження є визначення тривалості перегріву провідників в обмотці. Припустимо, що час нагріву провідника обмотки є малим, тому нехтуємо ним і приймаємо його миттєвим. Припустимо також, що температура трансформаторного масла буде незмінна із-за його природної циркуляції.

Отримавши температуру обмотки згідно описаних вище формул, можна визначити ступінь старіння ізоляції відповідності до формули Монтзінгера за "восьмиградусним правилом" теплового старіння електротехнічної ізоляції,

яке прийнято в якості закону старіння ізоляції. Витрати робочого ресурсу ізоляції, визначаються за формулою:

$$\tau_T = \tau_0 \cdot e^{-a \cdot \Delta T}, \quad (2.19)$$

де  $\tau_T$  – строк служби ізоляції в режимі роботи, який викликаний перегрівом ізоляції  $\Delta T$ ;  $\tau_0$  – строк служби ізоляції при нагріві ізоляції, який відповідає номінальному режиму роботи трансформатора;  $a$  – коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу ізоляції.

Перегрів  $\Delta T$  визначається за таким виразом:

$$\Delta T = T_x - T_n, \quad (2.20)$$

де  $T_n$  - температура нагріву ізоляції при номінальному режиму роботи трансформатора ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_x$  - фактична температура нагріву ізоляції ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Час охолодження провідника обмотки знаходиться за формулою [102]:

$$\tau = \frac{Mc(T_{\Pi} - T_n)}{\alpha F \left( \frac{T_{\Pi} + T_n}{2} - T_M \right)}, \quad (2.21)$$

де  $M$  — маса проводу довжиною один метр, кг;  $c$  — теплоємність металу, Дж/(кг·К);  $T_{\Pi}$  – температура перегріву,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_n$  – температура нормальна,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  – площа поверхні,  $\text{m}^2$ ;  $T_M$  – температура рідини,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Отримавши температури обмотки згідно формули (2.6) можна визначити наскільки тепловий ресурс зменшився згідно відомого рівняння Монтзінгера:

$$T = Ve^{-a\theta}, \quad (2.22)$$

де  $T$  – термін роботи в роках,  $\theta$  — температура обмотки ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $V$  – та  $a$  – коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу ізоляції.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі використовувались розрахунки при проектуванні трансформатора згідно [104].

Отримані результати дослідження опубліковані в [105].

## **2.2 Нечітка математична модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, який працює в режимі перевантаження**

Підкреслимо, що викладена в параграфі 2.1 математична модель дозволяє оцінити ступінь старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, коли останній працює в режимі перевантаження або коли з'являються короточасні стрибки навантаження. Безумовно, це дає можливість в підвищенні імовірності визначення моменту часу, коли робочий ресурс ізоляції обмоток буде на межі вичерпання свого робочого ресурсу, а, отже, підвищити точність діагностування обмоток трансформатора.

Як видно з наведених вище математичних виразів для достовірного визначення ресурсу ізоляції обмоток необхідно здійснювати вимірювання деяких технічних параметрів трансформатора, зокрема геометрії осердя, товщину та спосіб укладки обмоток в секції та інше.

Очервидно, що такі вимірювання легко здійснити на етапі виробництва трансформаторів або в процесі їх поточного та капітального ремонтів. В режимі звичайної експлуатації таку інформацію частково можна знайти в експлуатаційного персоналу або в документації на відповідний трансформатор. А тому застосування вищевикладеної математичної моделі, незважаючи на її оригінальність, може бути ускладненим.

Беззаперечним є той факт, що застосування розробленої математичної моделі для іншого типу масляного трансформатора вимагатиме отримання знову всіх його геометричних параметрів, що є додатковим ускладненням при побудові системи діагностування силового трансформатора.

В даному параграфі пропонується за розробленою вище математичною моделлю, її застосуванням та отриманням певних результатів дослідження ізоляції обмоток трансформатора побудувати нечітку математичну модель на основі теорії нечітких множин [106].

У разі побудови нечіткої моделі та її налаштуванні набагато простіше



буде застосувати її на працюючому обладнанні, коли необхідно буде визначати лише параметри режиму та навколишнього середовища.

Очевидно, що реалізація зазначеної моделі спростить її застосування і для інших типів масляних трансформаторів.

Для побудови такої моделі будемо використовувати такі вхідні параметри: рівень навантаження трансформатора, рівень перевантаження (або підвищеного навантаження) під час стрибка навантаження, тривалість перевантаження (або підвищеного навантаження) під час стрибка навантаження, температура навколишнього середовища.

На першому етапі побудови нечіткої моделі необхідно визначити можливий діапазон зміни параметрів контролю стану електрообладнання та проаналізувати їх. Вихідним показником моделі буде ступінь перегріву ізоляції обмоток у відносних одиницях.

З врахуванням зазначених зауважень вхідні параметри нечіткої моделі та їх лінгвістична оцінка наведені в таблиці 2.1.

Параметр  $x_4$  – кількісний, для опису температури навколишнього середовища, інші  $x_1$  –  $x_3$  – якісні, для опису використовується умовна шкала 0...100. Для опису якісних параметрів використовується лінгвістична оцінка відповідно до термів, що показані в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Вхідні параметри нечіткої моделі та їх лінгвістична оцінка

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
$x_1$	Рівень навантаження до стрибка	0 ... 100	низьке(Н), середнє(С), високе(В)
$x_2$	Рівень навантаження стрибка	0 ... 100	низьке(Н), середнє(С), високе(В)
$x_3$	Тривалість стрибка навантаження	0 ... 100	низька(Н), середня(С), висока(В)
$x_4$	Температура навколишнього середовища	-30°C ... 40°C	низька(Н), середня(С), висока(В),

Відповідно дерево логічного висновку має вигляд (рис. 2.4).

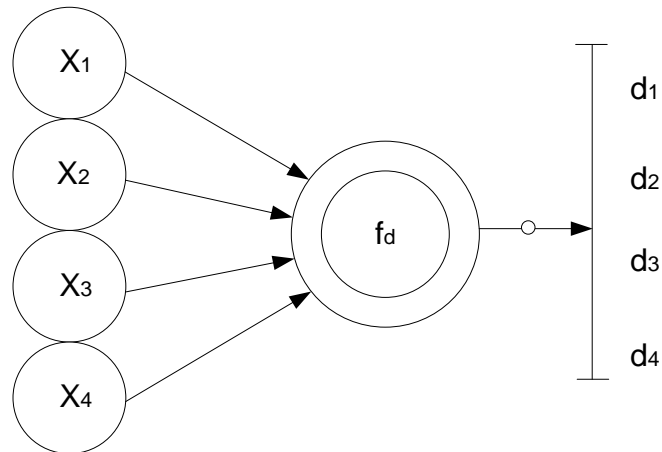


Рисунок 2.4 – Дерево логічного висновку

У відповідності з теорією нечітких множин необхідно визначити рівні зміни вихідного показника. Ступінь перегріву будемо визначати на таких рівнях(терма):  $d_1$  – дуже низький,  $d_2$  – низький,  $d_3$  – середній,  $d_4$  – високий.

Наведені рівні  $d_1 \dots d_4$  будемо вважати ступенями перегріву, згідно отриманих результатів буде відбуватись корегування ступеню перегріву класичної моделі визначення ступеня перегріву об'єкта дослідження.

Подальшим кроком моделювання є формування експертної бази знань. Нечітка база знань є носієм експертної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між вихідними змінними. Вигляд фрагменту нечіткої бази знань показано в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Фрагмент нечіткої бази знань

x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	d
Н	В	В	С	d <sub>3</sub>
Н	В	В	В	
С	В	В	С	
С	С	В	В	
В	В	Н	Н	
В	В	С	Н	
В	В	В	Н	
В	В	С	С	
В	С	С	В	
В	В	С	В	
В	В	В	Н	
В	С	В	С	
В	С	В	В	
В	В	Н	В	
С	В	В	В	d <sub>4</sub>
В	В	В	С	
В	В	В	В	

В додатку А знаходиться повна база знань правил.

Для лінгвістичної оцінки входних чинників  $x_1 - x_4$  використовується нечіткі терми. Представимо терми у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функції налаженості (ФН)

$$\mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (2.23)$$

в якій  $c$  і  $\sigma$  – параметри ФН;  $c$  – координата максимуму функції;  $\sigma$  – коефіцієнт концентрації-розтягування.

На основі бази знань і ФН темів, використовуючи операції  $\bullet$ (І – min) і  $\vee$ (АБО – max), складемо нечіткі логічні рівняння, що описують фізичні процеси в трансформаторі. Нечіткі логічні рівняння необхідні для виконання процедури дефазифікації, тобто отримання результатів моделювання.

У прогнозуванні ступеню перегріву від відповідного навантаження

точність перевіряється за допомогою відомих на певному часовому проміжку даних для формування нечіткої бази правил. Підібрана дослідним шляхом найбільш відповідна форма функцій належності для вхідних і вихідних параметрів моделі.

Як відомо, у базі нечітких правил правило If-Then використовується для отримання прогнозованого результату ступеня перегріву. В запропонованій нечіткій моделі сформовано 81 правило. Як приклад, деякі правила наведені нижче і показані на рисунку 2.5. Безпосередньо форма представлення декількох правил подана нижче:

- Якщо (рівень навантаження до стрибка низький) і (рівень навантаження стрибка низький) і (тривалість стрибка навантаження низька) і (температура навколишнього середовища низька), то (ступень перегріву дуже низький);
- Якщо (рівень навантаження до стрибка високий) і (рівень навантаження стрибка середній) і (тривалість стрибка навантаження висока) і (температура навколишнього середовища низька), то (ступень перегріву низький);
- Якщо (рівень навантаження до стрибка високий) і (рівень навантаження стрибка високий) і (тривалість стрибка навантаження низька) і (температура навколишнього середовища висока), то (ступень перегріву середній);
- Якщо (рівень навантаження до стрибка високий) і (рівень навантаження стрибка високий) і (тривалість стрибка навантаження висока) і (температура навколишнього середовища висока), то (ступень перегріву високий).

Результат математичного моделювання із застосуванням компонентів нечітких множин і правил зображені на рисунках 2.6 – 2.8 . Моделювання здійснювалось в середовищі MATLAB R2012b [107].

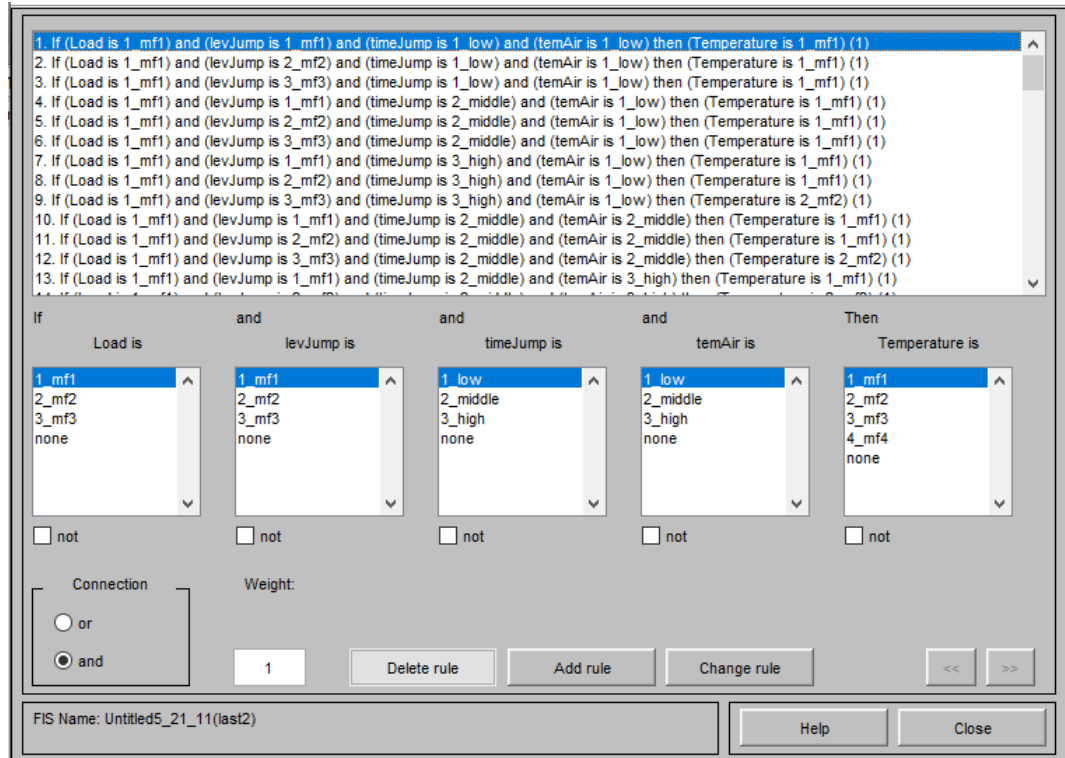


Рисунок 2.5 – База нечітких правил

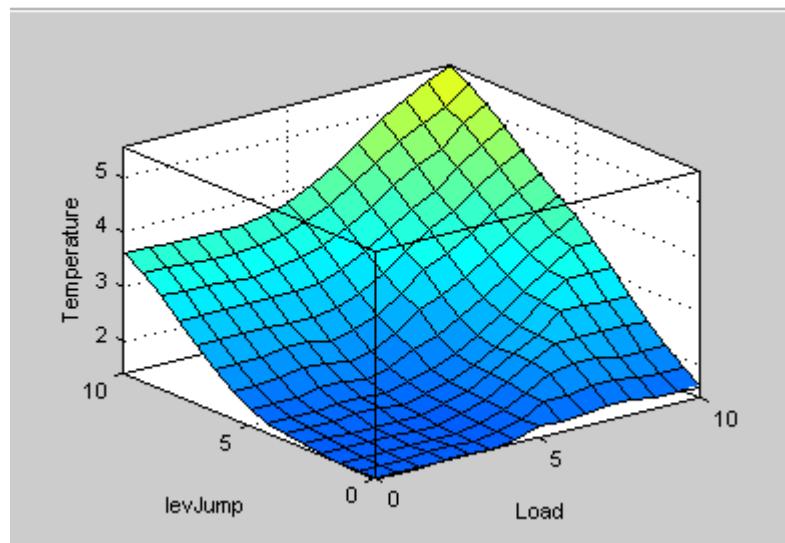


Рисунок 2.6 – Залежність ступеню перегріву від рівня навантаження до стрибка і рівня навантаження стрибка

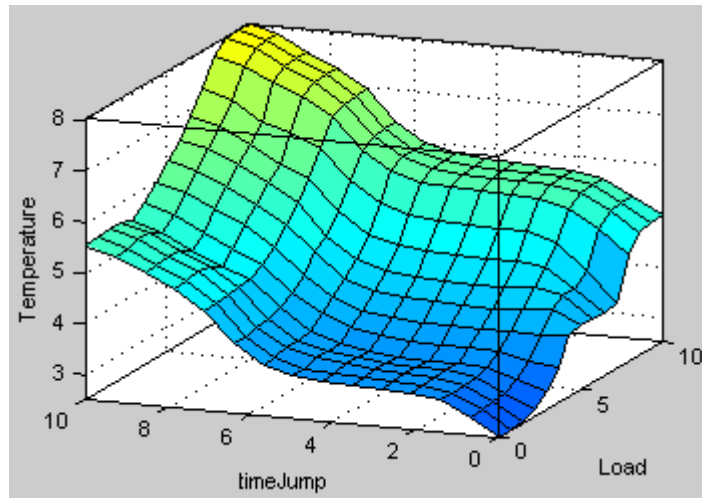


Рисунок 2.7 – Залежність ступеню перегріву від рівня навантаження до стрибка і тривалості стрибка

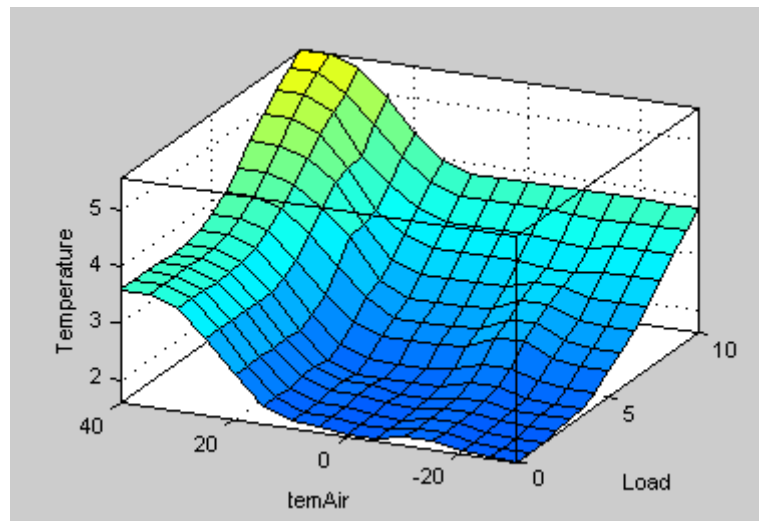


Рисунок 2.8 – Залежність ступеню перегріву від рівня навантаження до стрибка і температури навколишнього середовища

Отже, в результаті моделювання ми отримали модель, якість застосування якої залежить від досвіду експерта та коректності сформованих нечітких правил. Очевидно, що для отримання бажаного результату прогнозування ступеню зносу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, який повністю співпадатиме з результатами оцінки теплового зносу ізоляції обмоток, необхідно провести налаштування нечіткої моделі.

### **2.3 Нечітка математична модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження**

Підкреслимо, що в останні десятиріччя поряд з силовими масляними трансформаторами в електричних мережах широко використовуються силові сухі трансформатори. Це обумовлено тим, що сухі трансформатори, на відміну від інших типів, де використовується трансформаторне масло, мають низку переваг, зокрема підвищена пожежобезпечність, краща екологічність, простота введення в експлуатацію, невисокі експлуатаційні витрати тощо [108, 109].

Стан ізоляції сухих трансформаторів, як і іншого електрообладнання, під впливом температури погіршується а, отже з часом це може призвести до вичерпання робочого ресурсу ізоляції, внаслідок чого обладнання стає непридатним для експлуатації.

Зауважимо, що температура ізоляції обмоток трансформатора обумовлена як зміною його навантаження, так і впливом навколишнього середовища.

На сьогодні використання нечітких математичних моделей є достатньо поширеним способом для визначення залишкового ресурсу ізоляції трансформатора та діагностування несправностей трансформатора. Так в роботі [110] проведено дослідження, яке класифікує несправності на 5 категорій та порівнює результат з різними математичними моделями.

В роботі [111] наведені сімейства характеристик силових сухих трансформаторів, якими визначається тривалість їх роботи в залежності від навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження, перевантаження та температури навколишнього середовища. Зазначається, що перевищення тривалості вказаного перевантаження є недопустимим, оскільки при цьому настає момент неконтрольованого погіршення стану ізоляції, що може призвести до виведення трансформаторів з ладу. Крім того, вказані дискретні значення температури навколишнього середовища не дозволяють оцінити допустиму

тривалість перевантаження, а, отже, погіршення стану ізоляції в проміжках між двома вказаними сусідніми значеннями температури.

Як приклад, графіки тривалості можливого перевантаження (хвилини, години) в залежності від допустимого перевантаження (%) для трифазних сухих трансформаторів потужністю 630 – 2500 кВ·А з литою ізоляцією типу «Geafol» при температурі охолоджувального повітря 20° С наведені на рисунку 2.9.

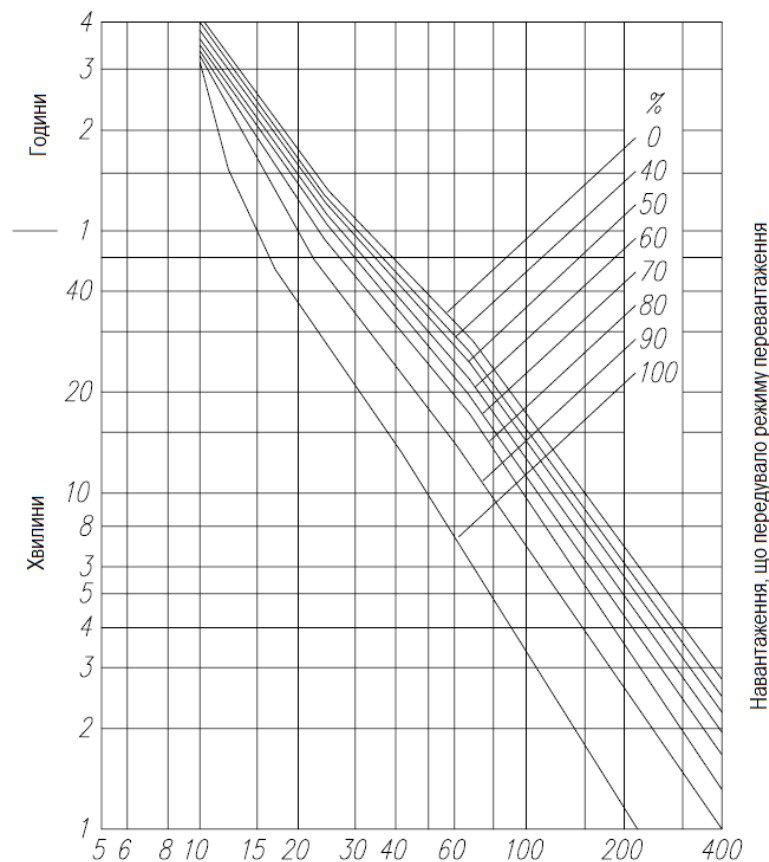


Рисунок 2.9 – Графік тривалості можливого перевантаження в залежності від допустимого перевантаження для трифазних сухих трансформаторів потужністю 630 – 2500 кВ·А з литою ізоляцією типу «Geafol» при температурі охолоджувального повітря 20°С

Підкреслимо, що зазначені характеристики окреслюють роботу трансформаторів в режимі перевантаження. Але, очевидно, що і в процесі роботи силового трансформатора в режимі, що не перевищує номінальне наванта-



ження, ресурс ізоляції, який більшою мірою визначається його тепловим режимом роботи, теж витрачається нерівномірно. І, враховуючи той факт, що завод-виробник трансформаторів надає їм гарантійний термін експлуатації, є можливим гарантовано експлуатувати трансформатори понад нормативний строк експлуатації у разі відслідковування процесу старіння та погіршення стану ізоляції трансформаторів в процесі їх роботи.

Зазначимо також, що на стан ізоляції сухих трансформаторів впливають вологість середовища, а в окремих випадках – наявність впливу вітру, рівень сонячної радіації тощо.

Нормативні документи [112, 113] не містять рекомендацій по врахуванню впливу, наприклад, вологості навколишнього середовища або швидкості вітру (при використанні трансформаторів у відповідних умовах) на температуру поверхні обмоток сухого трансформатора, хоча вплив таких чинників очевидний. Виникає питання, як враховувати вплив зазначених та інших зовнішніх чинників на коректне врахування спрацьовування робочого ресурсу ізоляції сухого трансформатора відповідно до умов його експлуатації.

Для побудови математичної моделі, яка враховуватиме основні фактори впливу на процес старіння ізоляції обмоток силових сухих трансформаторів, що дозволить визначати допустиму тривалість роботи в режимі перевантаження  $a$ , отже, своєчасне відслідковування вичерпання робочого ресурсу ізоляції та виведення трансформаторів з експлуатації пропонується наступний підхід. Побудуємо математичну модель, що оснований на методах нечіткої логіки [114, 115], яка дозволяла б визначати допустиму тривалість роботи сухого трансформатора в режимі перевантаження в умовах відсутності проміжних табличних даних поміж заданими значеннями температури згідно паспорту трансформатора. Будемо враховувати тільки основні параметри впливу на стан ізоляції трансформатора, зокрема навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження, перевантаження, температуру охолоджувального повітря та вологість навколишнього середовища. Очевидно, що в разі необхідності експерт може в математичну модель ввести і інші додаткові фактори

впливу.

На першому етапі побудови моделі визначаємо можливий діапазон зміни її вхідних параметрів. Вихідним параметром моделі буде допустима тривалість ввімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження.

З врахуванням зазначених зауважень вхідні параметри моделі та їх лінгвістична оцінка наведені в таблиці 2.3.

Згідно з [114, 115] задача полягає в тому, щоб кожному сполученню значень параметрів поставити у відповідність одне із значень допустимої тривалості ввімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження  $d_j (j = \overline{1,5})$ .

Для побудови моделі використовуємо 4 вхідних параметри. Всі ці параметри  $x_1 \div x_4$  – кількісні та піддаються вимірюванням, однак параметри  $x_1$  та  $x_2$  будемо задавати у відсотках.

Таблиця 2.3 – Вхідні параметри моделі та їх лінгвістична оцінка наведені

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
$x_1$	Навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження	0% ... 100%	дуже низьке (ДН), низьке (Н), середнє (С), високе (В), дуже високе (ДВ)
$x_2$	Перевантаження	0% ... 400%	дуже низьке (ДН), низьке (Н), середнє (С), високе (В), дуже високе (ДВ)
$x_3$	Температура охолоджувального повітря	-25°C ... 40°C	дуже низька (ДН), низька (Н), середня (С), висока (В)
$x_4$	Вологість повітря	40% ... 80%	низька (Н), середня (С), висока (В)

У відповідності з теорією нечітких множин [115] необхідно визначити рівні зміни вихідного показника. Прийmemo, що допустиму тривалість ввімкнення сухого трансформатора будемо визначати на таких рівнях (терма):  $d_1$  – дуже висока,  $d_2$  – висока,  $d_3$  – середня,  $d_4$  – низька,  $d_5$  – дуже низька.

Наведені рівні  $d_1 \dots d_5$  будемо вважати характеристиками, за якими визначається допустима тривалість ввімкнення трансформатора в режимі перевантаження.

Структура моделі зображена на рисунку 2.10 у вигляді дерева логічного

висновку (це граф, структура якого відображає класифікацію чинників  $\{x_1 \dots x_n\}$ , які впливають на прогнозований показник  $\{d\}$ ), що відповідає співвідношенню

$$d = f_d(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (2.24)$$

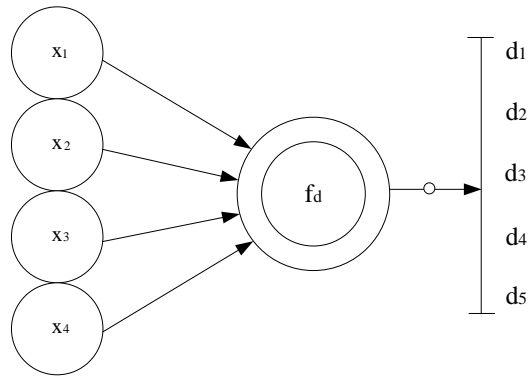


Рисунок 2.10 – Дерево логічного висновку

Подальшим кроком моделювання є складання експертної бази знань. Нечітка база знань є носієм експертної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між вихідними змінними.

Користуючись введеними термами і знаннями експертів, представимо співвідношення (2.24) у вигляді нечіткої бази знань, що подана в таблиці 2.4.

Для лінгвістичної оцінки вхідних чинників  $x_1 - x_4$  використовуються нечіткі терми. Представимо терми у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функцій належності [115]

$$\mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (2.25)$$

де  $c$  і  $\sigma$  – параметри функції належності:  $c$  – координата максимуму функції;  $\sigma$  - коефіцієнт концентрації-розтягування.

Таблиця 2.4 – Нечітка база знань

x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	d
ДН Н	ДН Н	С Н	С Н	d <sub>1</sub>
Н С С В С С Н	Н Н С Н Н Н С	С В Н Н С В Н	С С Н С В Н С	d <sub>2</sub>
С В С В С Н	С С С С В	С Н Н Н ДН С	С С Н В С	d <sub>3</sub>
С С В С В ДВ ДВ	В В В С С С	С В Н В В С С	С С Н В С Н В	d <sub>4</sub>
В В В ДВ ДВ ДВ ДВ	В ДВ ДВ В В ДВ ДВ	В С Н С В В ДН	В Н Н С С В С	d <sub>5</sub>

Значення коефіцієнтів  $\sigma$  і  $\sigma$  для всіх термів наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Коефіцієнти  $c$  і  $\sigma$ 

Параметри	Терми	$c$	$\sigma$
$x_1$	(ДН)	-20	8,496
	(Н)	-10	
	(С)	10	
	(В)	30	
	(ДВ)	50	
$x_2$	(ДН)	40	12,74
	(Н)	70	
	(С)	100	
	(В)		
	(ДВ)		
$x_3$	(ДН)	0	1,062
	(Н)	2,5	
	(С)	5	
	(В)	7,5	
	(ДВ)		
$x_4$	(Н)	0	21,23
	(С)	50	
	(В)	100	

На основі бази знань і функцій належності термів, використовуючи операції  $\bullet$  (І – min) і  $\vee$  (АБО – max), складемо нечіткі логічні рівняння, що описують цю модель (2.26 – 2.30).

Ці логічні рівняння моделі визначення допустимої тривалості ввімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження мають вигляд:

$$\mu^{d_1}(d) = \left[ \mu^{ДН}(x_1) \cdot \mu^{ДН}(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right]; \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_2}(\mathbf{d}) = & \left[ \mu^H(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right];
\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_3}(\mathbf{d}) = & \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^{DH}(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right];
\end{aligned} \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_4}(\mathbf{d}) = & \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^H(\mathbf{x}_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(\mathbf{x}_1) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_2) \cdot \mu^C(\mathbf{x}_3) \cdot \mu^B(\mathbf{x}_4) \right];
\end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_5}(\mathbf{d}) = & \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^{DH}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right].
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Зауважимо, що ваги правил не зазначені, оскільки під час грубого налагодження їхні значення дорівнюють одиницям.

Фіксуючи конкретні вхідні параметри моделі та застосовуючи запропоновану модель, для визначення чіткого значення допустимої тривалості ввімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження застосуємо метод дефазифікації «центра ваги» [116].

Результат математичного моделювання із застосуванням компонент теорії нечітких множин зображено на рисунок 2.11. Моделювання здійснювалось в середовищі Matlab R2012b [107].

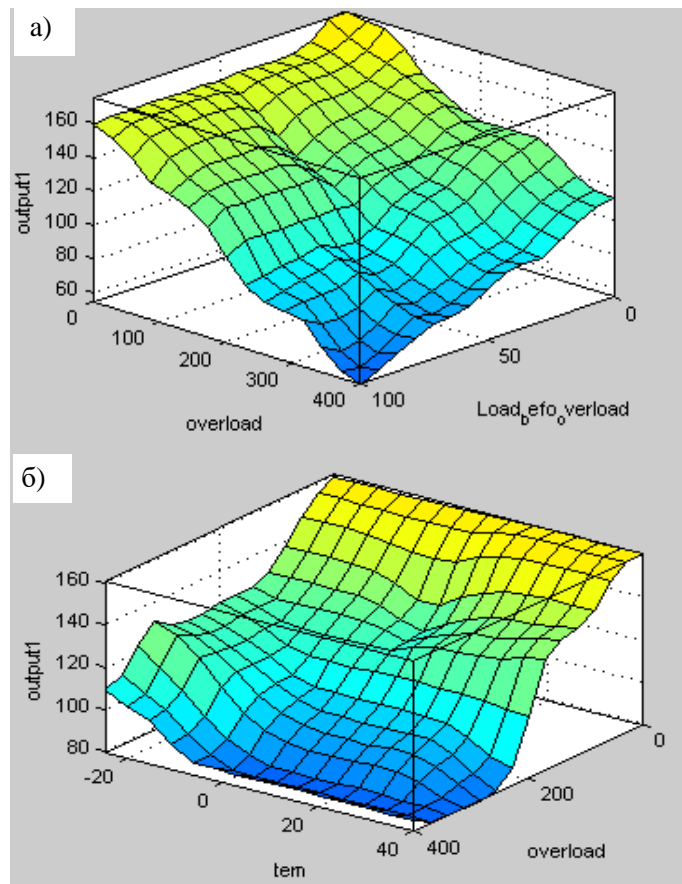


Рисунок 2.11 – Залежності допустимої тривалості ввімкнення трансформатора в режимі перевантаження від впливу: а) перевантаження та навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження; б) температури охолоджувального повітря та навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження

Підкреслимо, що значення вихідного результату залежить від багатьох факторів, зокрема якості правил у нечіткій базі знань, форми функцій належності, методу дефазифікації та способів виконання нечітко-логічних операцій. Ця теза підтверджується тим, що на перших етапах налаштування математичної моделі похибка сягала майже 100%. Окрім того, дослідження показують, що різні чинники впливу по різному відображаються на отримуваному результаті.

Тому, очевидно, що параметри моделі доцільно налаштовувати одним із відомих методів оптимізації. Застосуємо метод параметричної оптимізації. В результаті виконання процедури дещо змінився вигляд функцій належності.



Так, наприклад, на рисунках 2.12 і 2.13 для фактора впливу «температура охолоджувального повітря» зображені терми функцій належності, параметри яких мають місце до і після застосування процедури оптимізації відповідно.

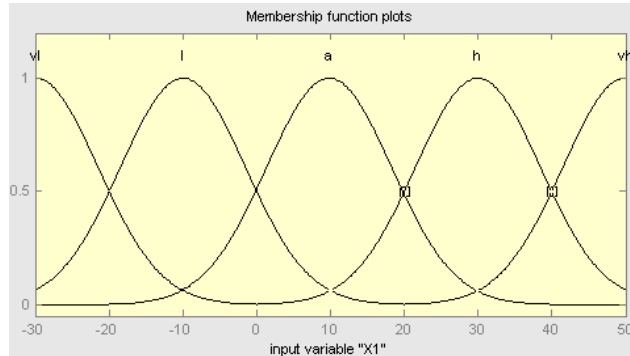


Рисунок 2.12 — Функції належності для параметра  $x_1$  до застосування процедури оптимізації

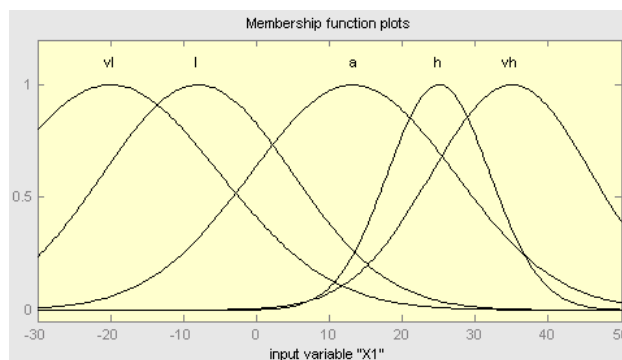


Рисунок 2.13 — Функції належності для параметра  $x_1$  після застосування процедури оптимізації

Отримані результати дослідження опубліковані в [117].

## 2.4 Математична модель для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора на основі нейронної мережі

Відомо, що штучна нейронна мережа (ШНМ), а також її програмні або апаратні реалізації імітують структуру і властивості нервової системи живих організмів [118]. Нейронна мережа отримує на вході набір сигналів, які

обробляються за відповідною математичною моделлю, внаслідок чого формується вихідний сигнал, що є рішенням і певним наближенням до бажаного розв'язання задачі.

В теперішній час ШНМ знаходять своє застосування при вирішенні задач в різних областях (медицина, економіка, зв'язок, транспорт і багато інших). Для галузі електроенергетики одним із актуальних завдань є необхідність достовірного прогнозування різного роду параметрів на основі обмежених фактичних даних.

Відомо, що ізоляція будь-якого електроенергетичного обладнання в процесі роботи змінює свої властивості під дією температурних впливів [119]. Така ж проблема має місце і під час експлуатації силових трансформаторів. Нормативні документи вказують, що термін експлуатації трансформаторів сягає до 20 років, якщо ізоляція експлуатувалась за умови допустимих перегрівів для відповідного класу ізоляції. Але в разі перевищення допустимих робочих температур термін експлуатації зменшується в залежності від інтенсивності перегріву.

В роботі [111] зазначається, що за умови забезпечення певних режимів експлуатації, які передбачають роботу трансформаторів з температурами обмоток, менше допустимих, трансформатори можуть короткочасно працювати з перевантаженням без зменшення терміну служби. Зокрема, для трансформаторів типу ТСГЛ потужністю 630—2500 кВА з ізоляцією “Geafol” наведені графіки, які характеризують тривалість  $t$  допустимого перегріву ізоляції в залежності від температури навколишнього середовища  $T$ , інтенсивності перевантаження  $P^*$  та рівня навантаження  $P$ , який мав місце безпосередньо перед перевантаженням.

Оскільки надійна роботи трансформатора є ключовою для функціонування енергосистеми тому підвищення точності прогнозування допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження, є важливим для планування планових ремонтів та експлуатації енергосистеми в цілому. Проте дане завдання є складним через непостійний і хаотичний

характер факторів, які впливають на трансформатор, зокрема температура навколишнього середовища, пориви вітру і вологість.

На сьогодні розроблено різні математичні методи для визначення допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації. Зокрема, в [120] авторами запропоновано математичну модель, яка дозволяє визначати допустимий термін роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації за відомими температурою навколишнього середовища, рівнем перевантаження та значенням навантаження, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження для випадків, коли температура навколишнього середовища знаходиться між ресурсними площинами. Даний спосіб доволі точно дає можливість прогнозування, проте є громіздким. Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для визначення допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації полегшує роботу з математичним апаратом.

У проведеному дослідженні представлена штучна нейронна модель для прогнозування допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації за відомими температурою навколишнього середовища, рівнем перевантаження та значенням навантаження, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження і дає можливість прогнозувати допустимі перевантаження у різних ресурсних площинах, які не надаються виробником.

Для побудови нейронної мережі необхідно створити вибірку вхідних даних. Базуючись на графіках, які характеризують тривалість  $t$  допустимого перегріву ізоляції в залежності від температури навколишнього середовища  $T$ , інтенсивність перевантаження  $P^*$  та рівень навантаження  $P$  трансформаторів типу ТСГЛ потужністю 630—2500 кВА з ізоляцією “Geafol”, отримано оцифровані значення ресурсних характеристик роботи силового сухого трансформатора в режимі перевантаження для температур навколишнього

середовища 10, 20, 30, 40 °С [111]. Як приклад, в таблиці 2.6 наведено дані, що мають місце при температурі навколишнього середовища 10 °С.

Таблиця 2.6 – Дані ресурсних характеристик при 10 °С

		<i>t</i> (хв) при <i>T</i> = 10 °С											
<i>P</i> *(%)	<i>P</i> (%)	15	20	30	40	50	60	80	100	150	200	300	400
0		240	160	80	56	44	35	25	18	10	7	3,9	2,7
40		230	150	74	53	40	33	23	17	9,5	6,2	3,6	2,4
50		220	125	68	50	37	30	21	16	9	5,6	3,2	2,2
60		210	120	62	46	34	28	19	15	8	5,1	2,9	2
70		200	100	59	43	31	26	18	14	7	4,8	2,6	1,9
80		190	95	54	37	28	23	15	12	6	4,2	2,3	1,6
90		185	85	45	31	24	18	13	9	5	3,3	1,8	1,3
100		180	65	32	22	15	12	8	5,5	3	2	1,1	0,5

Отримавши ресурсні характеристики при інших різних значеннях температури навколишнього середовища, будуємо нейронну мережу (рисунок 2.14) у середовищі Matlab Neural Network Training Tool та перевіряємо процес навчання нейронної мережі і здатність нейронної мережі до навчання.

Розмір прихованого шару був підібраний експериментальним шляхом. Було обрано прихованих шарів із 20 нейронів. В статті моделюємо нейронну мережу прямого зв'язку, використовуючи середовище розробки Matlab [107 ].

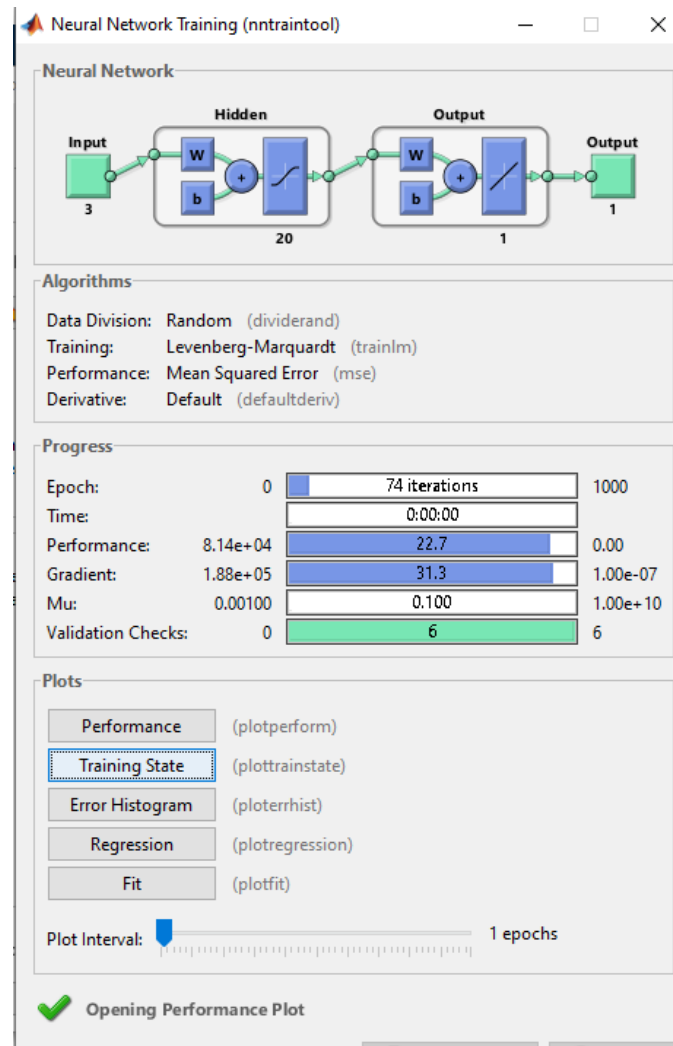


Рисунок 2.14 — Процес навчання мережі в Matlab

Під час тренування зразкові значення параметрів подаються в мережу та коригують її відповідно до помилки. На етапі перевірки зразкові значення використовуються для вимірювання узагальнення мережі та для припинення навчання, коли вона перестав вдосконалюватися. Тестування не впливають на навчання і тому забезпечують незалежний показник ефективності роботи мережі під час та після навчання. Для побудови моделі використовувалось 20 шарів нейронів. На рисунках 2.15 та 2.16 демонструється процес навчання розробленої нейронної мережі.

Для ілюстрації яості налаштування нейронної нижче наведені наведені графіки регресії.

На рис. 2.15 наведено порівняння значення бажаних параметрів розрахунку та значення, розраховані з використанням нейронної мережі.

Для цієї мережі отримане значення регресії становить 0,99628, що вказує на відповідність 99,6%.

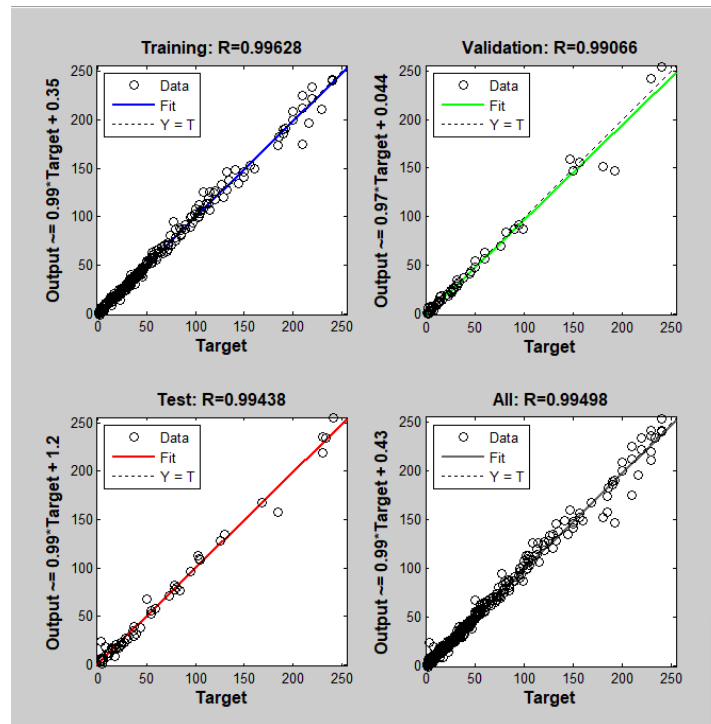


Рисунок 2.15 — Графіки регресії

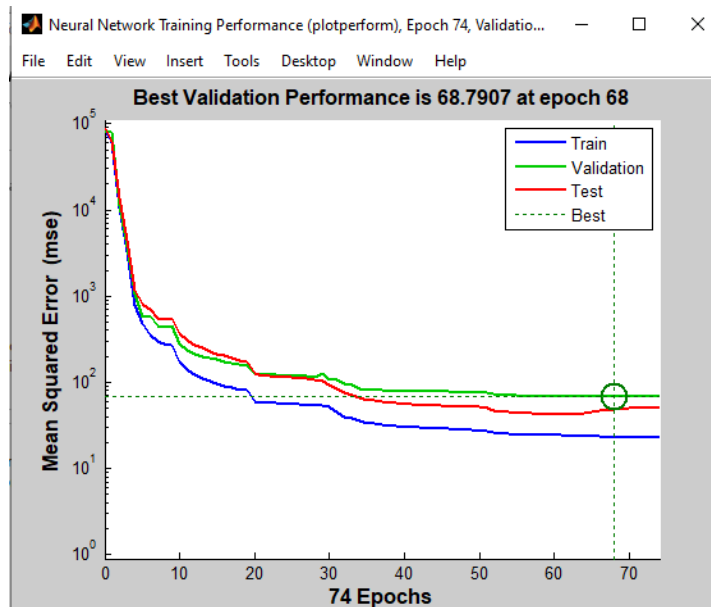


Рисунок 2.16 — Процес навчання нейронної мережі

На рисунку 2.17 зображено частоту помилок діапазону набору даних. Вісь X вказує на різноманітні значення помилок нейронної мережі, а вісь Y

вказує на кількість випадків помилок, які були передбачені мережею. В цьому випадку, концентрація значень помилки становить 0,06002, тим самим передбачаючи, хороші якісні показники нейронної мережі.

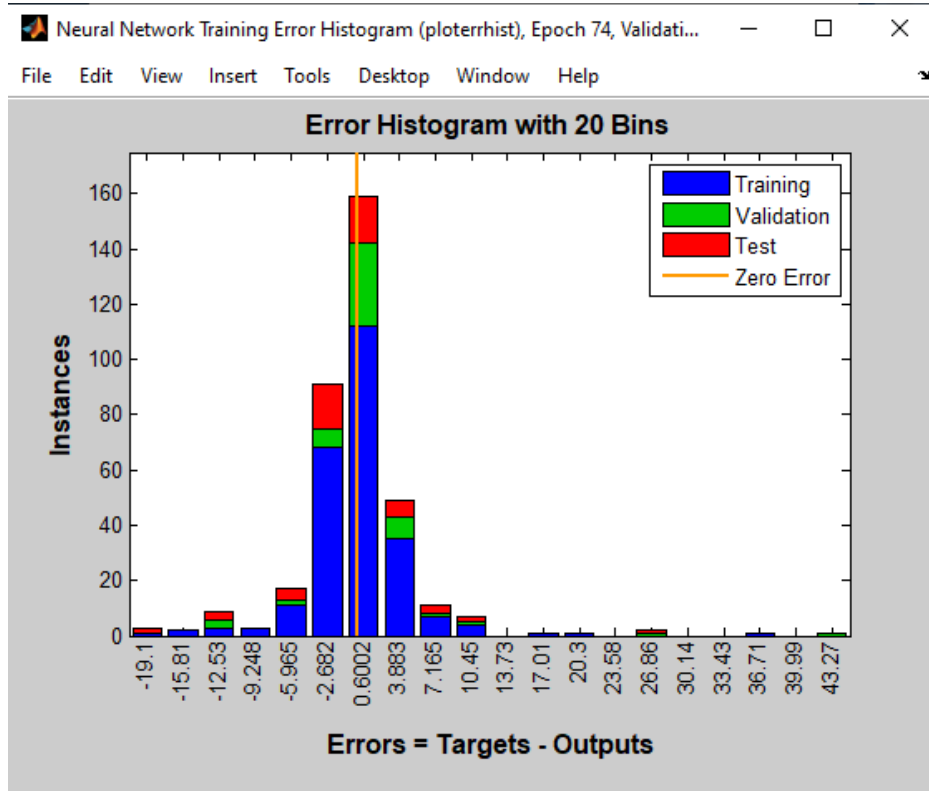


Рисунок 2.17 — Гістограма помилок

Згідно з дослідженням [120] перевірка адекватності моделі пройшла успішно, результати порівняння даних, сформованих нейронною мережею та розраховані за згадуваною математичною моделлю, наведені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати порівняння даних, сформованих нейронною мережею і отриманих за математичними розрахунками

	$T, ^\circ C$	$P^*, \%$	$P, \%$	$t, хв$
Математичні розрахунки	16	35	75	40.5
Нейронна мережа	16	35	75	41

В таблиці 2.8 і 2.9 наведені вибіркові дані результатів прогнозування

нейронної мережі щодо допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації за відомою температурою навколишнього середовища, рівнем перевантаження та значенням навантаження, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження, де  $t_n$  - це час у хвиликах, який спрогнозовано нейронною мережею, а  $t$  час згідно [111] у хвиликах.

Таблиця 2.8 – Дані порівняльних розрахунків

$T, ^\circ C$	$P^*, \%$	$P, \%$	$t, \text{хв}$	$t_n, \text{хв}$
10	15	0	240	247.4
10	20	40	150	137.9
10	30	50	68	65.8
10	40	60	46	44.3
10	50	70	31	33.3
10	60	80	23	23.9
10	80	90	13	11.7
10	100	100	5.5	4.0
10	150	80	6	5.1
10	200	80	4.2	4.6
10	300	40	3.6	3.5
10	400	60	2	2.3

Таблиця 2.9 – Дані нейронної мережі для температури  $14 ^\circ C$

$T, ^\circ C$	$P^*, \%$	$P, \%$	$t_n, \text{хв}$
14	15	0	198.3
14	20	40	120.8
14	30	50	62.1
14	40	60	41.4
14	50	70	28.8
14	60	80	18.6
14	80	90	7.2
14	100	100	1.1
14	150	80	4.4
14	200	80	4.3
14	300	40	1.8
14	400	60	0.7

В рамках дослідження вдалось створити нейронну мережу із



застосуванням багатосаровогой перцептрона та на основі вимірних значень навчити її прогнозувати тривалість роботи трансформатора без збільшення його строку служби. В результаті аналізу роботи такого прогнозування отримані показники дуже близькі до реальних та мають дуже малу похибку, що обумовлено використанням великої кількості навчальних даних.

## **2.5 Висновки по матеріалу другого розділу**

1. Запропоновано іноваційний метод визначення температури обмоток силового трансформатора з урахуванням опосередкованих вимірювання на основі законів теплопередачі, який з високою точністю дозволяє спрогнозувати температури обмотки при тривалих ікороткочаних стрибках навантаження. Метод зв'язує між собою електричний струм в обмотці трансформатора з кількістю теплоти яке виділить обмотка, а також зв'язує з температурою яка буде на краю і в центрі обмотки на основі передачі тепла від металевої пластини з внутрішнім джерелом тепла і трансформаторного масла, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування силового трансформатора.

2. Запропонована нечітка математична модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі перевантаження. У запропонованому методі розглянуто можливості використання нечіткої логіки для прогнозування ступеня перегріву обмотки силового масляного трансформатора. Дана модель дозволяє у відносних одиницях спрогнозувати впливи зовнішніх чинників на ступень зносу і перегріву обмотки силового масляного трансформатора з урахуванням зовнішніх факторів.

3. Розглянуто можливості нечіткої математичної моделі для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження. У запропонованому методі розглянуто

можливості використання нечіткої логіки для прогнозування ступеня перегріву обмотки силового сухого трансформатора. Дана модель дозволяє у відносних одиницях спрогнозувати впливи зовнішніх чинників на ступень зносу і перегріву обмотки силового сухого трансформатора з урахуванням зовнішніх факторів.

4. Проведено дослідження для математичної моделі для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора на основі нейронної мережі. У математичні моделі вдалось створити нейронну мережу, багат шаровій перцептрон, та на основі оцифрованих значень навчити нейронну мережу прогнозувати тривалість роботи трансформатора без збільшення його строку служби. В результаті аналізу роботи такого прогнозування дуже близькі до реальних та мають малу похибку, при використанні великої кількості навчальних даних.

## РОЗДІЛ 3

### СИНТЕЗ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аналізуючи попередні розділи можна зробити висновок, що для діагностування ступеня старіння ізоляції обмоток силового трансформатора необхідно розробити відповідні пристрої.

З позицій діагностування вибраних для дослідження об'єктів запропоновані в розділі 2 математичні моделі не є рівноцінні. Великий інтерес викликає задача побудови відповідних пристроїв. Очевидно, що описані математичні моделі можна реалізувати у пристрої які повинні містити блоки прийому первинної інформації, основою яких є сенсори, блоки перетворення та обробки інформації з виведенням для оперативного персоналу.

З аналізу математичних моделей можна зробити висновок про те, що структури пристроїв, які потрібно синтезувати, повинні бути реалізовані з урахуванням елементів пам'яті та логічних висловлювань, а тому їхня структура буде достатньо складною.

Очевидно, що промисловістю пристрої, для яких синтезовані математичні моделі в розділі 2, не випускаються, то актуальною є задача синтезу структур пристроїв для діагностування обмоток силового трансформатора.

#### **3.1 Синтез структури пристрою для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі**

Синтезуємо структуру пристрою для діагностування ступеня старіння ізоляції силового трансформатора у відповідності до математичної моделі, викладеної в підрозділі 2.1.

Очевидно, що пристрій має містити сукупність цифрових блоків для

реалізації представленої математичної моделі. З моделі у розділі 2.1 випливає необхідність вимірювання двох параметрів, від яких залежить інтенсивність спрацювання робочого ресурсу ізоляції. Очевидно, що пристрій міститиме відповідні сенсори, вихідні аналогові сигнали яких необхідно представляти в цифровій формі для подальшого врахування та обробки.

Використаємо підхід логічно-структурного синтезу для розробки складових пристрою, в яких здійснюється обробка аналогових сигналів [121].

З врахуванням зазначених міркувань структурна схема пристрою для визначення теплового старіння ізоляції силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі зображена на рисунку 3.1.

На рисунку 3.1: 1, 2 – сенсор температури трансформаторного масла та сенсор струму відповідно; 3, 4 – перетворювач температури в напругу постійного струму та перетворювач струму в напругу постійного струму відповідно; 5, 6 – нормуючі перетворювачі сигналів; 7 – блок множення; 8, 9, 10 та 11 – масштабуючі перетворювачі; 12 – суматор; 13 – блок задання температури; 14 – суматор; 15 – компаратор; 16 – аналоговий комутатор; 17 – масштабуючий перетворювач; 18 – блок множення; 19 – блок задання ресурсу ізоляції в нормальному режимі експлуатації; 20 – аналого-цифровий перетворювач; 21 – цифровий суматор; 22 – регістр; 23 – генератор сигналів; 24 – розподілювач тактів; 25 – регістр; 26 – блок установки нуля; 27 – дешифратор; 28 – інформаційний екран; 29 – цифровий компаратор; 30 – блок задання ресурсу ізоляції цифровим способом; 31 – індикатор.

Запропонований пристрій працює так. При подачі напруги живлення блок установки нуля 26 формує імпульс, який обнулюють регістри 22 та 26. Одночасно генератор сигналів 23 починає формувати відповідну послідовність імпульсів.

Для вимірювання спрацювання ресурсу обмотки силового масляного трансформатора сенсори пристрою розподілені по об'єкту таким чином: сенсор температури 1 установлений в баку трансформатора та призначений для вимірювання температури трансформаторного масла у найбільш нагрітій

точці. Сенсор струму 2 встановлений в колі вторинної обмотки силового масляного трансформатора. Ці два сенсори дозволяють здійснити оцінку впливу температури на ізоляцію обмотки трансформатора у найбільш нагрітій точці. Підкреслимо, що за допомогою сенсорів 1 і 2 у відповідності з розробленою математичною моделлю можна контролювати температуру нагріву ізоляції обмотки силового масляного трансформатора, який працює в нормальному режимі і в режимі короткочасних перевантажень.

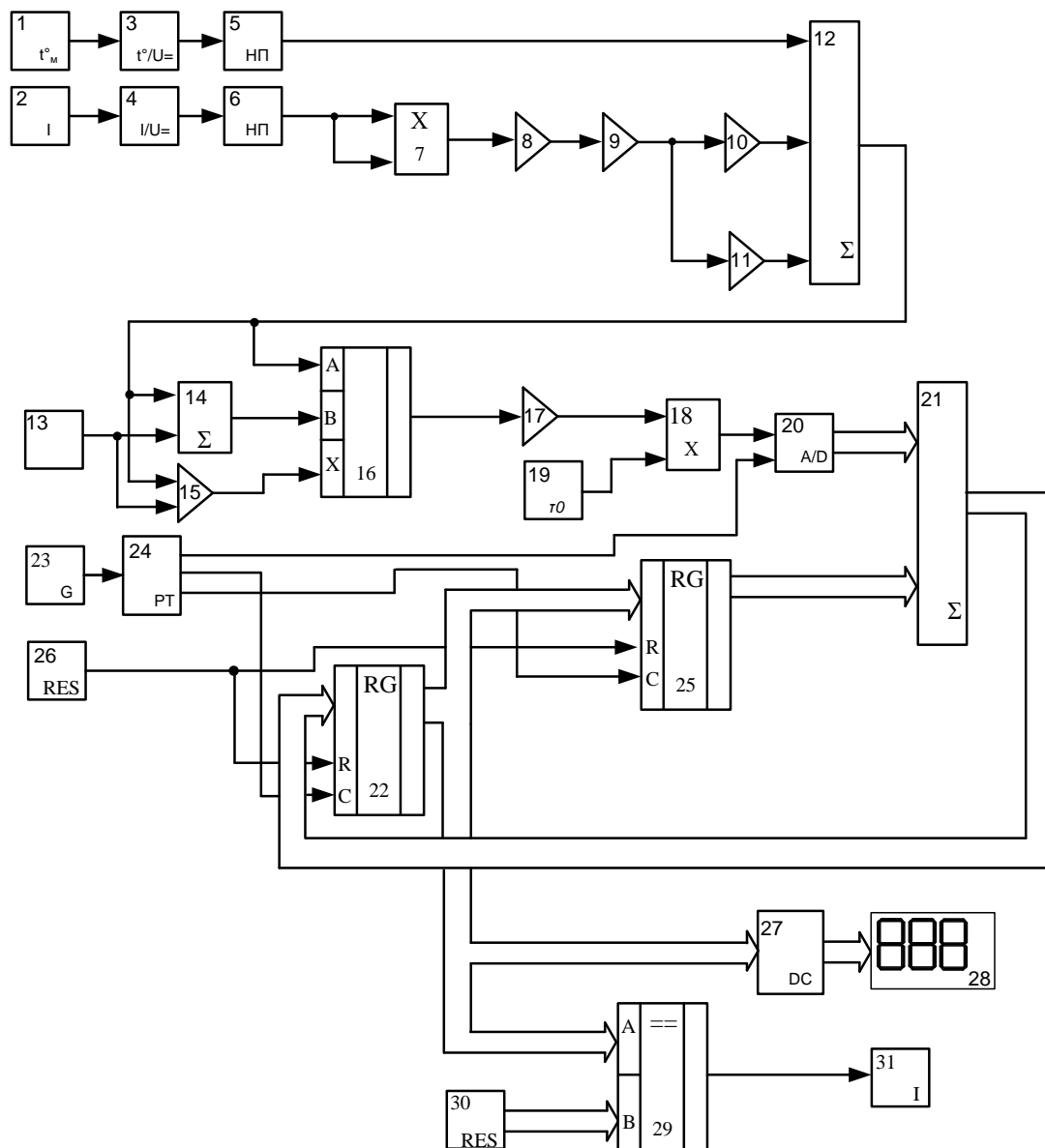


Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою для визначення теплового старіння ізоляції силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі

При вимірюванні робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора сигнал з сенсора температури 1 через перетворювачі 3 та 5 подається на перший вхід аналогового суматора 12. Також сигнал з сенсора струму 2 через перетворювачі 4 та 6 подається у блок множення 7 та з його виходу надходить сигнал на масштабуючий перетворювач 8. З виходу останнього формується сигнал  $Q=I^2 \cdot R$  який передається на вхід масштабуючого перетворювача 9, в якому здійснюється перетворення за формулою  $q = \frac{Q}{V}$  і сигнал надходить на масштабуючі перетворювачі 10 і 11. Зауважимо, що в масштабуючому перетворювачі 10 здійснюється формування вихідного сигналу за формулою  $\frac{q_v \delta}{\alpha}$ , а в масштабуючому перетворювачі 11 формується сигнал згідно математичного виразу  $\frac{q_v \delta^2}{2\lambda}$ . Вихідні сигнали з масштабуючих перетворювачів 10 і 11 надходять відповідно на другий і третій входи аналогового суматора, вихідний сигнал з якого одночасно подається на перші входи аналогового компаратора 16, суматора 14 та компаратора 15. В компараторі 15 порівнюється сигнал з виходу суматора 12 зі сигналом блока задання температури 13 і формується сигнал логічної одиниці для керування аналоговим компаратором 16. У випадку, коли сигнал з аналогового суматора 12 більший за сигнал блока задання температури 13, на виході компаратора 15 формується сигнал логічної одиниці і вихідний сигнал суматора 14 через аналоговий комутатор 16 надходить на вхід масштабуючого перетворювача 17. Блок задання температури 13, вихідний сигнал якого пропорційний температурі 95 °С, призначений для комутування за допомогою компаратора 15 та аналогового комутатора 16 сигналів, що дозволяють оцінити витрачання робочого ресурсу ізоляції обмоток трансформатора в нормальному режимі експлуатації, тобто коли температура обмотки не перевищує 95 °С і в режимі перевантаження, коли робоча температура перевищує зазначену температуру. В першому випадку сигнал з виходу суматора 12 подається безпосередньо

через аналоговий комутатор 16 в канал вимірювання відпрацьованого ресурсу ізоляції, а в другому випадку сигнал через суматор 14 та аналоговий комутатор 16 надходить в канал вимірювання відпрацьованого ресурсу з врахування підвищеного навантаження трансформатора, що спричиняє нагрів обмотки трансформатора вище 95 °С. Вихідний сигнал аналогового комутатора 16 надходить на вхід масштабуючого перетворювача 17, в якому обчислюється значення  $e^{0.087 \cdot \Delta T}$  та подається на перший вхід блока множення 18, на другий вхід якого подається в аналоговій формі сигнал з виходу блока задання ресурсу ізоляції в електричній формі 19, що відповідає номінальному терміну роботи ізоляції в нормальному режимі експлуатації. З виходу блока множення 18 сигнал надходить на вхід АЦП 20, в якому він перетворюється в цифровий код. Зауважимо, що зазначений цифровий код відповідає оцифруванню еквівалентного ресурсу ізоляції за одиницю часу.

Накопичення відоцифрованого ресурсу ізоляції визначається таким чином. За сигналами з виходу генератора імпульсів 24 на виходах розподільвача тактів 24 по черзі формуються короткочасні сигнали логічної одиниці. По сигналу на першому виході розподільвача тактів 25 в АЦП 21 аналоговий сигнал перетворюється в цифровий код і поступає на цифровий суматор 22. Враховуючи те що при ввімкненні зазначеного пристрою регістр 25 обнулюється то на виході цифрового суматора 22 з'являється код, аналогічний коду на виході АЦП 20. Цей цифровий код подається на вхід регістра 22 і по сигналу з другого виходу розподільвача тактів 24 записується в нього.

По сигналу з третього виходу розподільвача тактів 24 цифровий код з регістра 22 перезаписується в регістр 26. При черговому перетворенні аналогового сигналу в цифровий код в АЦП 20 по сигналу з першого виходу розподільвача тактів 24 в цифровому суматорі 21 додається поточне значення відпрацьованого ресурсу ізоляції зі значенням, отриманим в попередньому циклі. Результат додавання заноситься в регістр 22 і перезаписується в регістрі

25.

Таким чином, в циклі вимірювання ресурсу ізоляції в регістрі 22 накопичується цифровий код, що відповідає відпрацьованому ресурсу ізоляції обмотки в номінальному режимі роботи та в режимі перевантаження.

Інформація по відпрацьованому ресурсу через дешифратора 27 виводиться на цифровий індикатор 28.

Одночасно цифровий код з виходу регістра 22 надходить в цифровий компаратор 28, в якому здійснюється порівняння з цифровим кодом, записаним в блоці задання ресурсу 30, що відповідає повному вичерпанню робочого ресурсу ізоляції і при зрівнюванні цих кодів на виході цифрового компаратора 29 з'являється сигнал, який активує індикатор 31 і є свідченням оперативному персоналу про необхідність виведення трансформатора з експлуатації.

Очевидно, що представлений пристрій діагностування можна реалізувати і в мікропроцесорному виконанні.

### **3.2 Синтез структури пристрою для нечіткої математичної моделі визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора.**

Синтезуємо структуру пристрою для врахування впливу зовнішніх факторів, які мають місце при визначення залишкового ресурсу трансформатора, у відповідності до математичної моделі, викладеної в підрозділі 2.2.

Структурна схема, що характеризує проходження сигналів в пристрої для врахування впливу зовнішніх факторів з використанням апарату нечіткої логіки, зображена на рисунку 3.2.



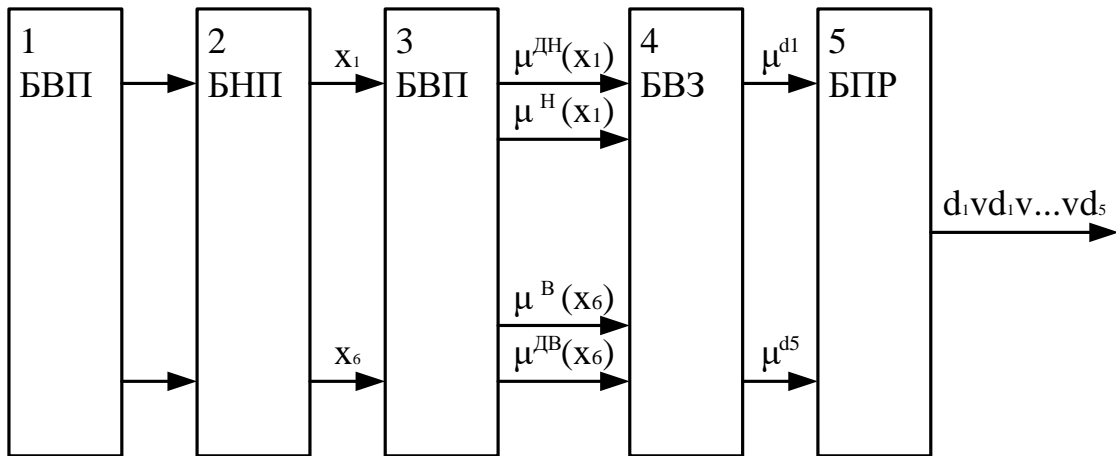


Рисунок 3.2 – Структурна схема пристрою для врахування впливу зовнішніх факторів

На схемі: 1 – блок введення контрольованих параметрів (введення з приладів або з пульта); 2 – блок нормуючих перетворювачів; 3 – блок визначення параметрів за ФН; 4 – блок визначення значень вагового коефіцієнта; 5 – блок прийняття рішення.

Блок введення контрольованих параметрів можливо реалізувати або у вигляді інтерфейсу для підключення приладів, в яких визначаються параметри факторів впливу, або у вигляді блока, що дозволяє встановлювати певний рівень сигналу (наприклад, струму), пропорційного відповідним параметрам факторів впливу.

Блок нормуючих перетворювачів 2 дозволяє узгодити між собою всі вхідні сигнали, які за своєю фізичною сутністю суттєво відрізняються один від одного.

Блок визначення параметрів за функціями належностей 3 реалізує математичні залежності ФН, параметри яких наведені в таблиці 2.2. Для спрощення структурної схеми реалізації блока визначення параметрів за функціями будемо використовувати трикутну ФН, яка має вигляд [122]:

$$\mu^T(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x \leq a, \\ \frac{x - a}{b - a}, & \text{якщо } a \leq x \leq b, \\ 1 + \frac{x - b}{b - c}, & \text{якщо } b \leq x \leq c, \\ 0, & \text{якщо } x \geq c, \end{cases} \quad (3.1)$$

де  $k_1, k_2, k_3$  – параметри ФН.

Реалізуємо апаратно задані ФН, користуючись методами логічно-структурного синтезу з використанням елементів аналогової схемотехніки.

На рисунку 3.3 а зображено структуру блока 1, який реалізує функцію згідно рисунку 3.3 б. Операційний підсилювач 1 інвертує вхідний сигнал, а підсилювач 2 виконує функцію суматора.

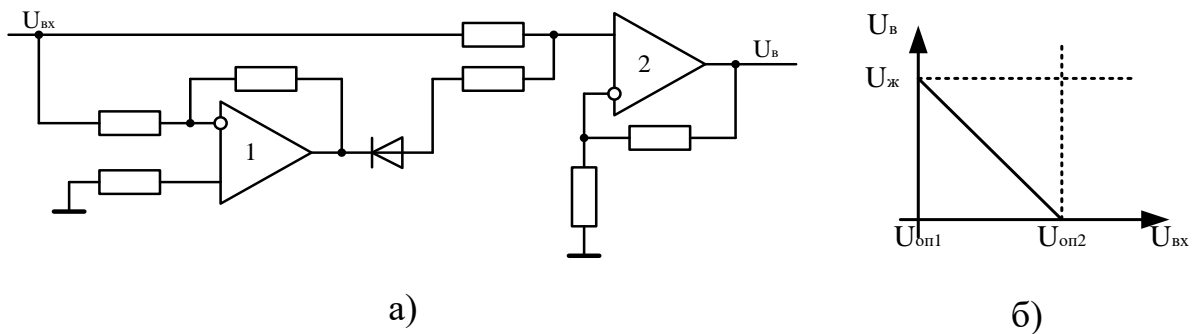


Рисунок 3.3 – Структурна схема блока 1

На рисунку 3.4 а зображена структурна схема блока 2, який реалізує функцію згідно графіка рисунок 3.13 б. Операційні підсилювачі 3 і 4 реалізують лінійні функції без інвертування та з інвертуванням сигналу відповідно, а підсилювач 5 виконує роль суматора. Сигнал  $U_{ж}$  відповідає напрузі живлення операційних підсилювачів.

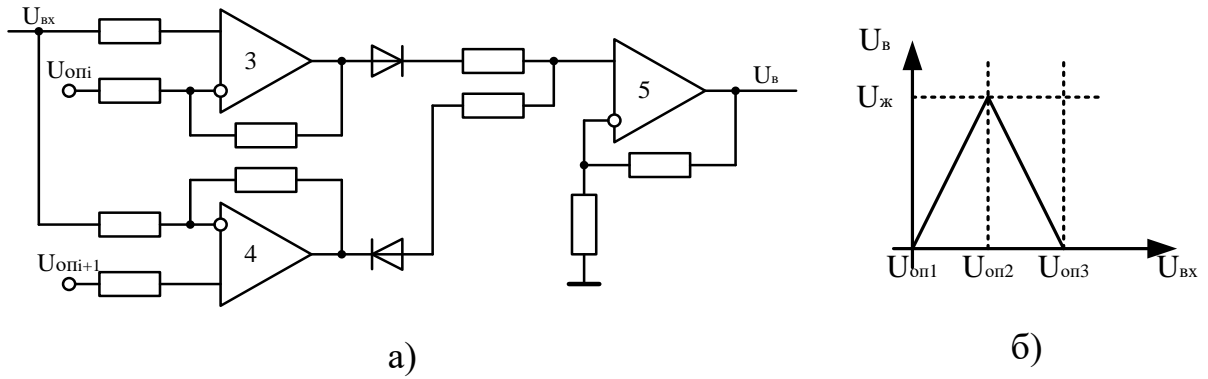


Рисунок 3.4 – Структурна схема блока 2

Структурна схема блока 3, що зображена на рисунку 3.5 а, реалізує лінійну функцію, зображену на графіку (рисунок. 3.5 б).

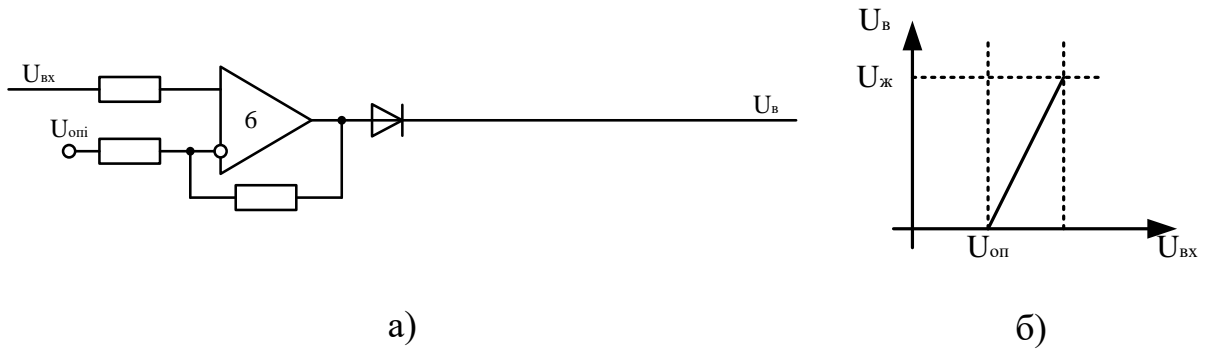


Рисунок 3.5 – Структурна схема блока 3

Поєднавши блоки 1–3, як показано на рисунку 3.6 а, отримаємо реалізацію тритермової лінгвістичної змінної (рисунок 3.6 б) відповідного вхідного сигналу.

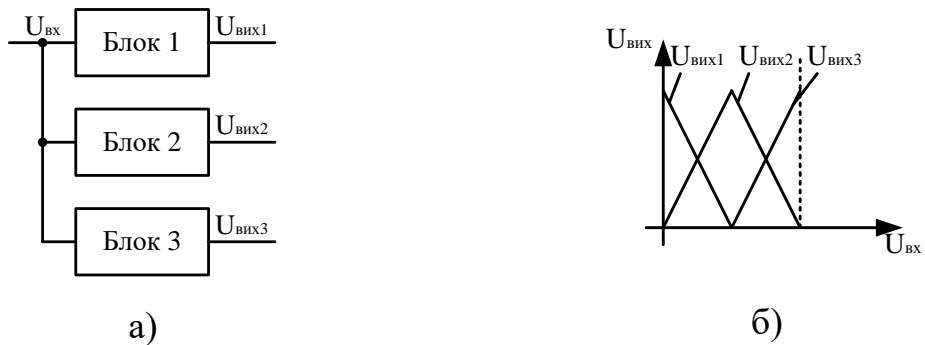


Рисунок 3.6 – Структурна схема блока, що реалізує тритермову лінгвістичну змінну

Реалізація чотирьохвимірної лінгвістичної змінної вхідного параметру та діаграми відповідних сигналів зображені на рисунку. 3.7 (а та б відповідно).

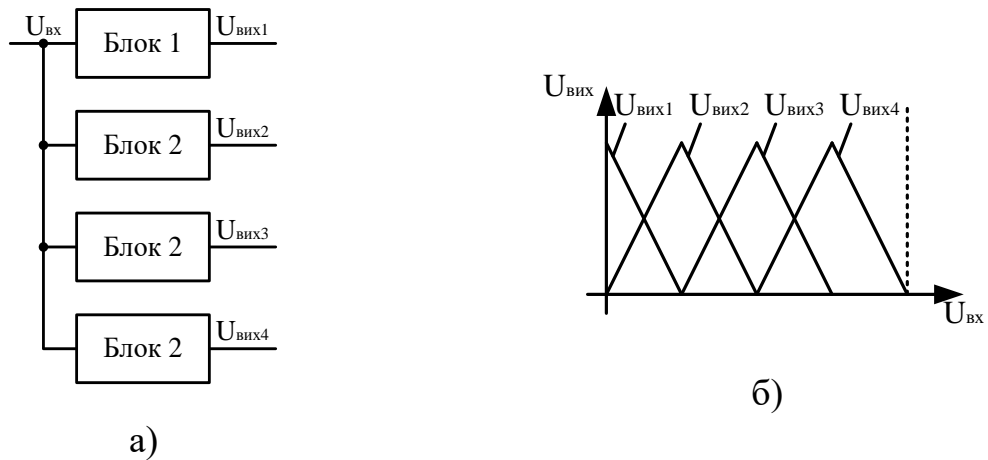


Рисунок 3.7 – Структурна схема блока, що реалізує чотиритермову лінгвістичну змінну

Таким чином можна реалізувати всі ФН, які наведені в підрозділі 2.2. Комбінуючи різні ввімкнення елементів, легко реалізувати блок визначення параметрів за ФН. Слід зазначити, що аналогічно можна отримати ФН з будь-яким видом термів. Для цього необхідно лише задати інший характер проходження сигналів через операційні підсилювачі. В роботі [123] наведено приклади отримання нелінійних залежностей вихідного сигналу від вхідного операційних підсилювачів.

Для реалізації блока визначення значень вагового коефіцієнта здійснимо згортання математичних виразів які впливають з нечіткої бази знань а саме з таблиці 2.2. В результаті отримаємо формули:

$$\begin{aligned}
\mu^{d_1}(d) = & \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \vee \\ \mu^B(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^C(x_2) \vee \\ \vee \mu^B(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \begin{pmatrix} \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \vee \\ \vee \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee \\ \vee \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \vee \\ \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \vee \\ \vee \mu^B(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_2) \vee \\ \vee \mu^C(x_2) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \begin{pmatrix} \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \vee \\ \vee \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \begin{pmatrix} \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_4) \vee \\ \vee \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_4) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^B(x_3) \vee \\ \vee \mu^H(x_3) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^H(x_3) \vee \\ \vee \mu^C(x_3) \vee \\ \vee \mu^B(x_3) \end{pmatrix} \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \begin{pmatrix} \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \vee \\ \vee \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee \\ \vee \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \end{pmatrix} \right],
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d_2}(d) = & \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_4) \vee}{\vee \mu^B(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_2) \cdot \left( \frac{\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \left( \frac{\mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \left( \frac{\mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_4) \vee}{\vee \mu^B(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right],
\end{aligned} \tag{3.3}$$

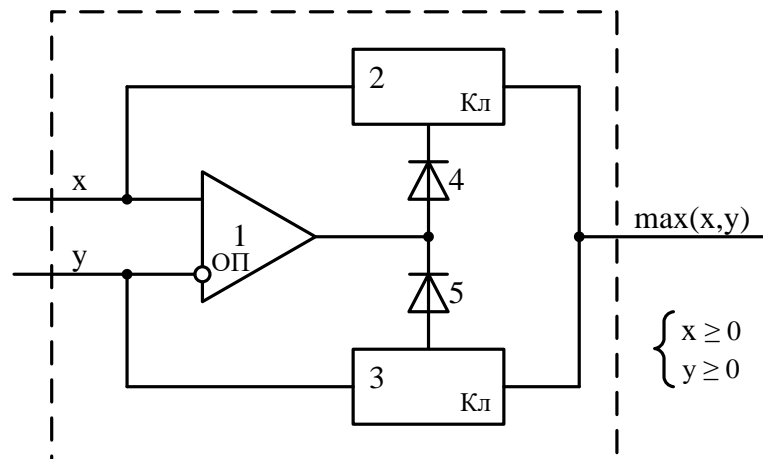
$$\begin{aligned}
\mu^{d_3}(d) = & \left[ \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_4) \vee}{\vee \mu^B(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^H(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4)} \right) \right] \vee
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \vee}{\vee \mu^B(x_2)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_4) \vee}{\vee \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_4)} \right) \right] \vee \\
& \vee \left[ \mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \vee}{\vee \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3)} \right) \right],
\end{aligned}$$

$$\mu^{d_4}(d) = \left[ \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \left( \frac{\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_4) \vee}{\vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_4) \vee} \right) \right]. \tag{3.5}$$

Оскільки в цих залежностях виконуються тільки дві операції (визначення найменшого або найбільшого значень), то реалізуємо процедуру знаходження  $\min$  або  $\max$  у вигляді відповідних електронних схем, що зображені на рисунку 3.8. На схемі: 1 – операційні підсилювачі, що виконують функцію диференціальних підсилювачів [124], 2, 3 – електронні ключі, 4, 5 – діоди.

а)



б)

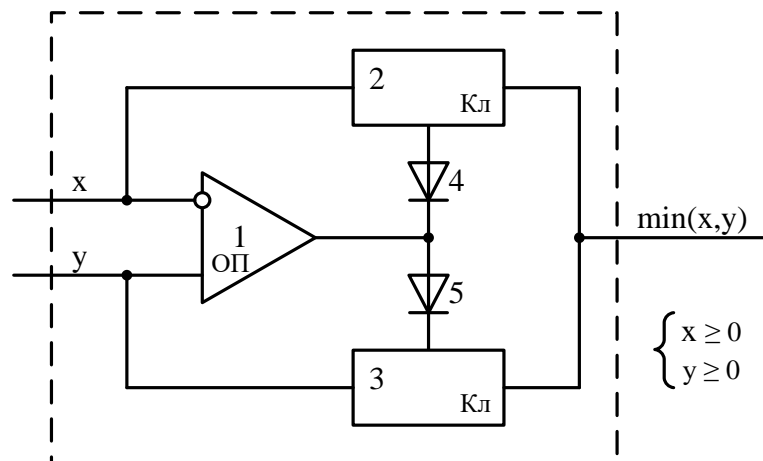


Рисунок 3.8 – Структурні схеми блоків для реалізації операцій  $\max$  (а) та  $\min$  (б)

Застосуємо синтезовані блоки для реалізації математичних залежностей, що характеризують кожне із можливих значень вагового коефіцієнта згідно запропонованого підходу.

На рисунках. 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 зображені структурні схеми модулів, що дозволяють реалізувати значення вагового коефіцієнта  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , та  $d_4$  відповідно в блоці визначення значень вагового коефіцієнта.



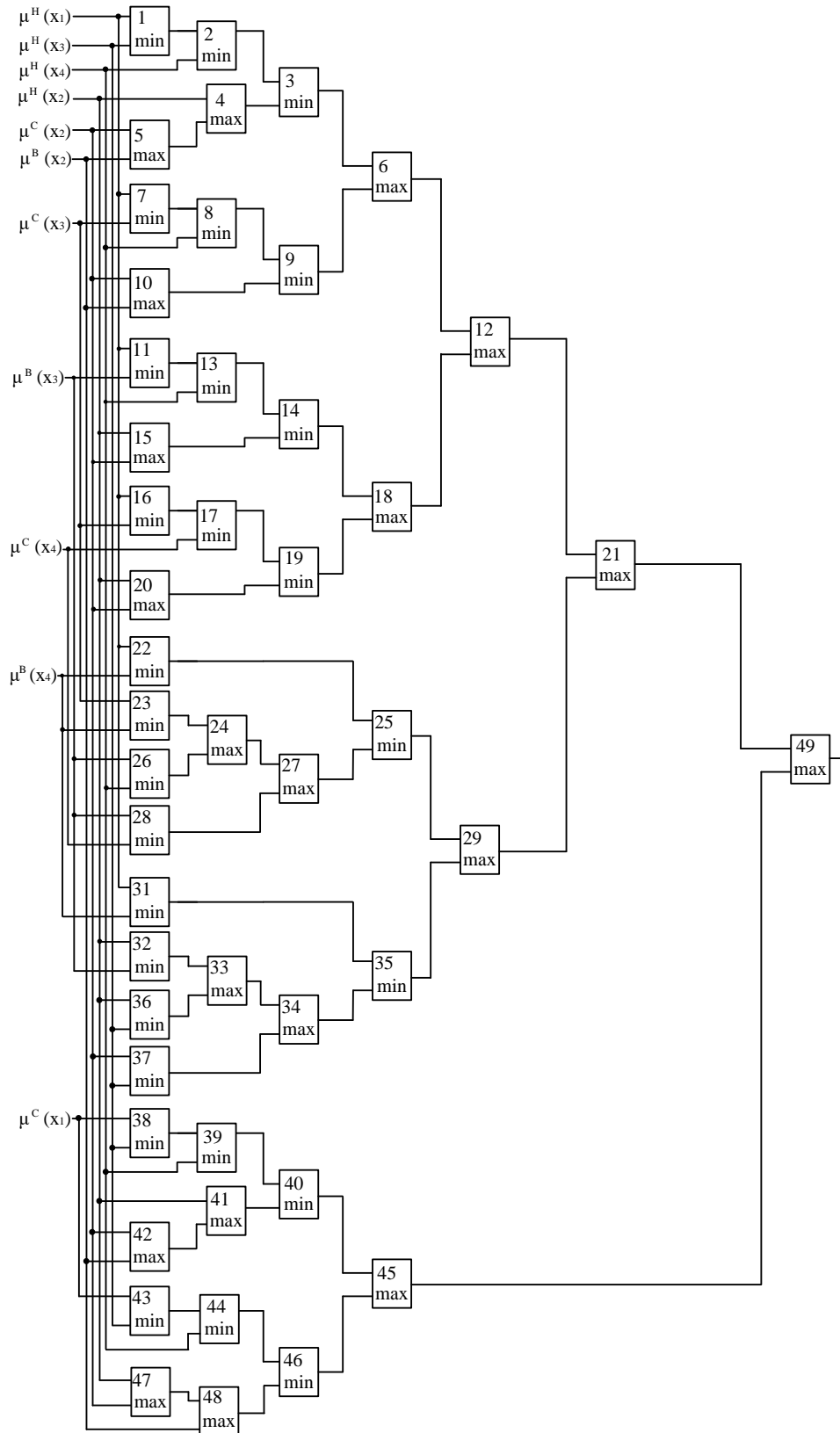


Рисунок 3.9 – Структурна схема модуля, що реалізує значення вагового коефіцієнта  $d_1$

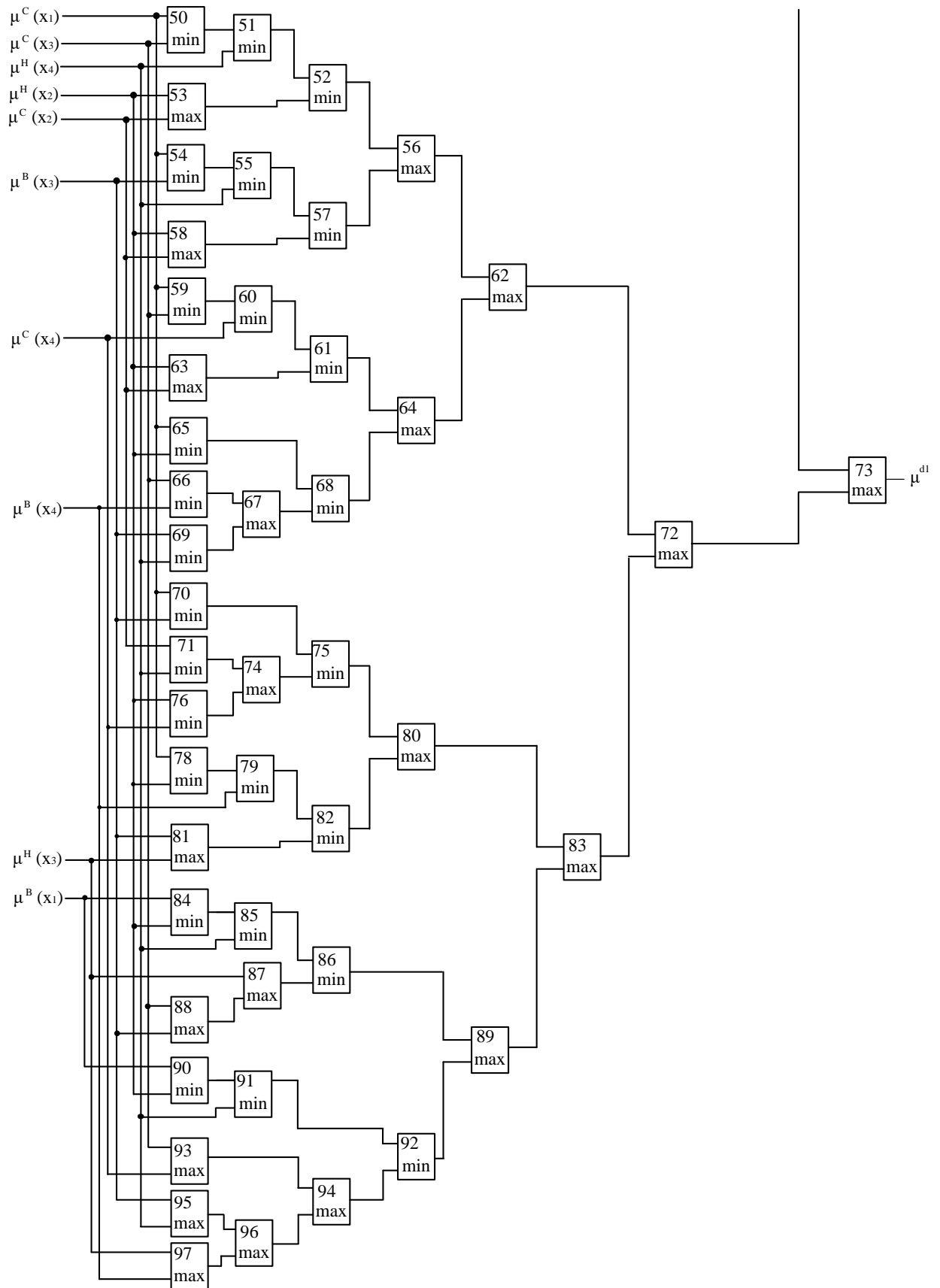


Рисунок 3.10 – Продовження структурної схема модуля, що реалізує значення вагового коефіцієнта  $d_1$

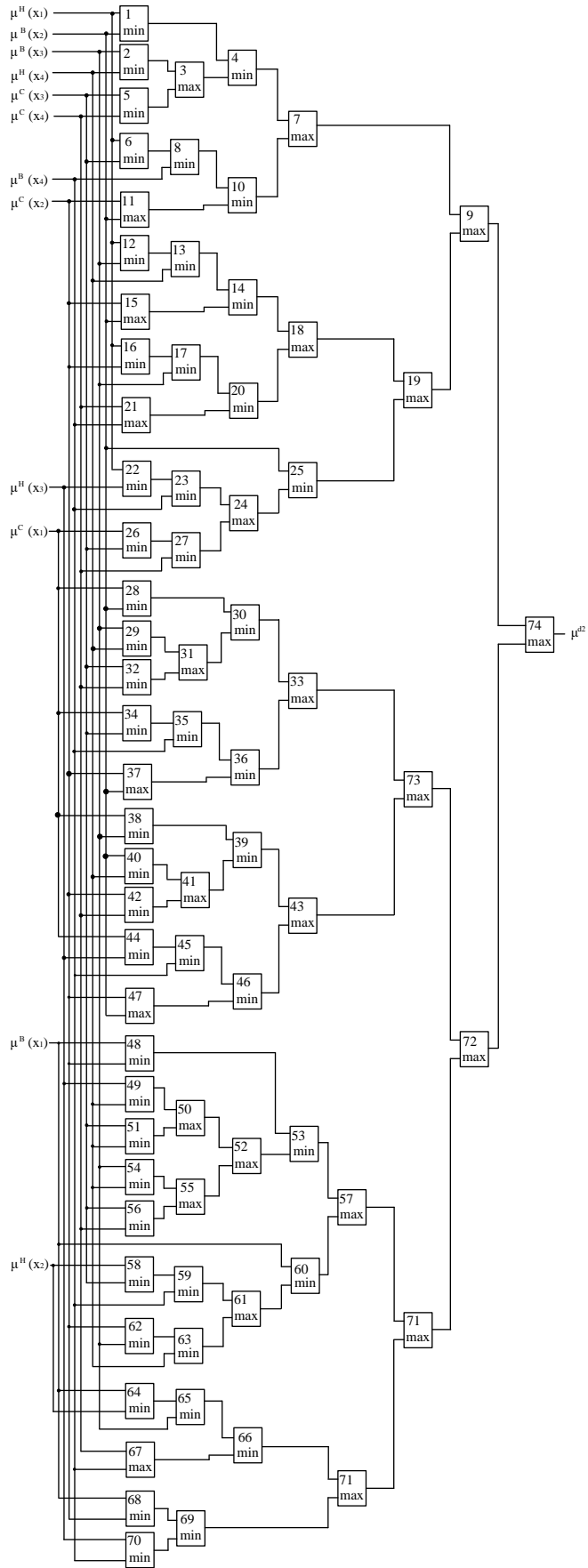


Рисунок 3.11 – Структурна схема модуля, що реалізує значення вагового коефіцієнта  $d_2$

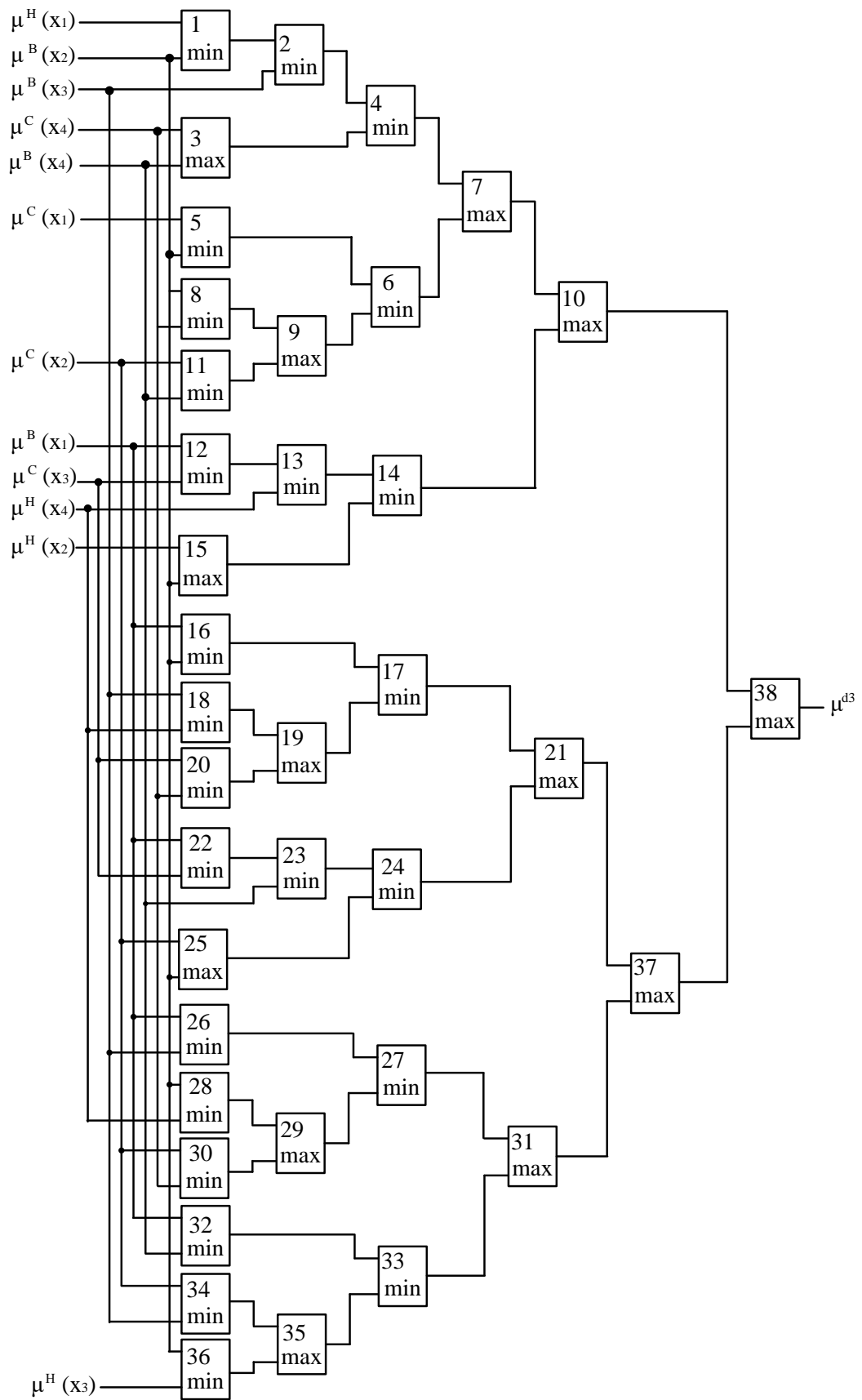


Рисунок 3.12 – Структурна схема модуля, що реалізує значення вагового коефіцієнта  $d_3$

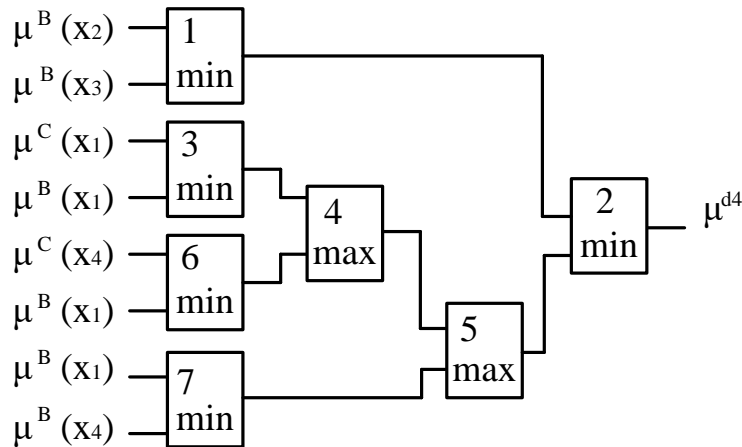


Рисунок. 3.13 – Структурна схема модуля, що реалізує значення вагового коефіцієнта  $d_4$

Вибір остаточного значення вагового коефіцієнта в синтезованому пристрої проводиться в блоці прийняття рішення 5. Структурна схема цього блока приведена на рисунку 3.14. На схемі: 1 – 3 – блоки, в яких визначається більший із двох вхідних сигналів, 4 – 7 – компаратори, 8 – 11 – елементи І, 12 – 15 – індикатори,  $R_1$  і  $R_2$  – резистори, що утворюють дільник напруги.

Робота блока прийняття рішення полягає в наступному. При подачі на входи сигналів, що відповідають сформованим значенням вагового коефіцієнта, в блоках 1 – 3 знаходиться найбільше із них значення, яке через дільник напруги подається на входи компараторів 4 – 7. В залежності від реального значення вагового коефіцієнта сигнал логічної одиниці буде тільки на виході одного із компараторів. При подачі сигналу “Індикація” відкривається тільки той із логічних елементів І, на якому сигнали співпадають, і включається відповідний індикатор.

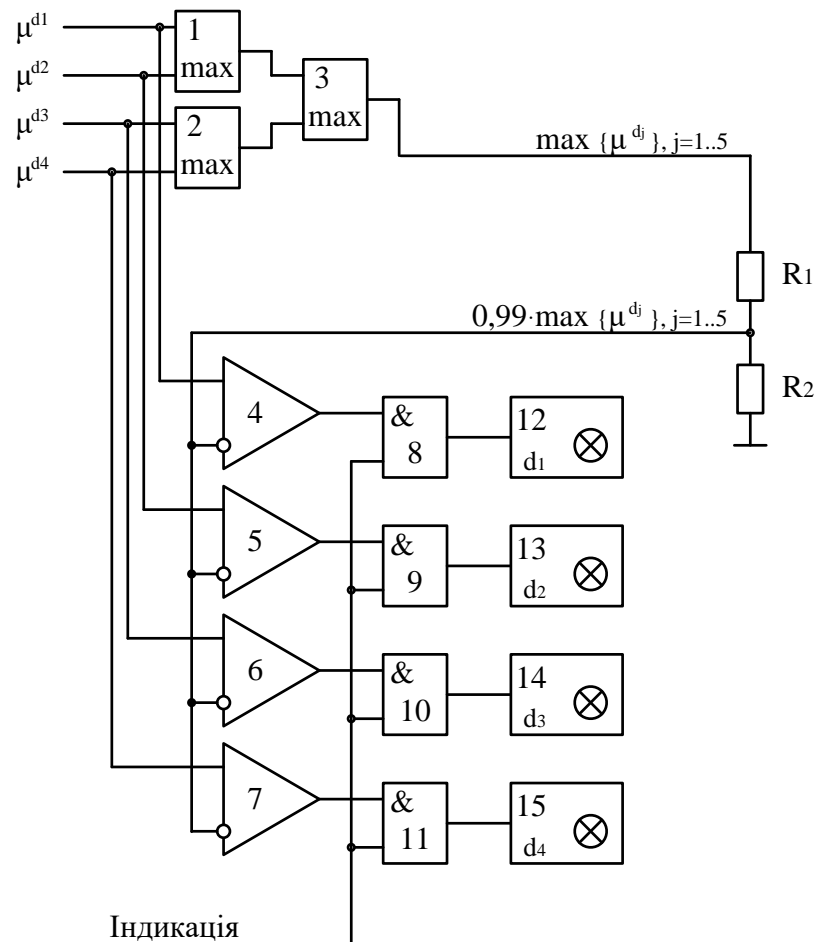


Рисунок 3.14 – Структурна схема блока прийняття рішення

Очевидно, що можливо виконати і іншу реалізацію пристрою для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, наприклад, програмно-апаратним шляхом на мікроконтролері або програмним шляхом на персональному комп'ютері.

### 3.3 Висновки по матеріалам третього розділу

Згідно розробленої математичної моделі запропоновано структура пристрою для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі. Запропонований метод синтезу, за яким, аналізується швидкість старіння ізоляції в нормальному і в режимі перевантажень, використовує суміш іноваційних і базових підходів,

на першому етапі реалізації визначаються ступінь нагріву ізоляції обмотки трансформатора, а саме отримуються дані з сенсора температури трансформаторного масла і сенсор струму обмотки які в процесі перетворення дають на виході температуру ізоляції, на другому етапі здійснюється аналіз вичерпаного ресурсу і сумування результатів еквівалентної роботи ізоляції трансформатора з виведення інформації оперативному персоналу. В результаті запропонований підхід дає можливість визначати короточасні перевантаження, які конвертуються в збільшений еквівалентний час експлуатації.

В другій частині розділу згідно розробленої математичної моделі запропонований спосіб для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі перевантаження на основі нечітких правил. Запропонований метод синтезу, за яким, враховується вплив зовнішніх факторів і характер режиму перевантажень, а сама температура навколишнього середовища, тривалість перевантаження та величина навантаження до моменту, коли навантаження вище номінального. Даний підхід, що дозволяє враховувати вплив вище згаданих параметрів для визначити як змінюється еквівалентне старіння дозволяє підвищити адекватність розробленої математичної моделі

## РОЗДІЛ 4

### МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ СТРУКТУР ТА ОЦІНКА ЇХ ТОЧНОСТІ РОБОТИ

В сучасних умовах стає нормою застосування мікропроцесорних засобів для реалізації будь-яких систем керування технологічним процесом, контролю або діагностування як окремих об'єктів, так і потужних технологічних комплексів. Сьогодні важко уявити сучасні пристрої від промислового до побутового застосування, які б не містили в собі мікропроцесорних засобів.

Основна перевага мікропроцесорних систем полягає у високій гнучкості, можливості швидкого налаштування, а при необхідності навіть змінити технічні завдання для виконання чи алгоритмів функціонування. Як правило, переналагодження таких засобів здійснюється програмним шляхом, без суттєвих виробничих затрат, що підвищує надійність функціонування таких систем та зменшує до мінімуму час їх налагодження. Крім того, мікропроцесор дозволяє легко реалізовувати принцип відкритих систем, функціональні можливості яких можуть змінюватись або нарощуватись по мірі необхідності або по мірі виникнення нових технічних засобів.

Очевидно, що такі системи, крім основної задачі, можуть виконувати низку різноманітних функцій: збір, зберігання і обробку інформації про об'єкт дослідження, передавання цієї інформації до інших рівнів системи та інші дії.

На сьогодні швидкими темпами здійснюється запровадження мікропроцесорних засобів в енергетичній галузі, що дозволяє реалізувати високонадійні системи діагностування, контролю чи керування, забезпечити їх гнучкість при адаптації до різних умов експлуатації, різних типів систем тощо [125].

В цій роботі, в розвиток зазначеного підходу, виникає необхідність розробки структур мікропроцесорних пристроїв для діагностування обмоток силових трансформаторів на прикладі системи аналізу і прогнозування нагріву обмоток силового трансформатора.



В теперішній час на ринку мікропроцесорів пропонуються для використання розробки таких фірм як Intel, Atmel, Microchip, Motorola, Analog Devices, Texas Instruments тощо [126], які конкурують між собою, але архітектура їх розробок є дуже схожою між собою.

Немає необхідності обґрунтовувати в переважній більшості випадків застосування якогось окремого мікроконтролера.

В деяких випадках для розв'язання технічних задач необхідно застосовувати зовнішню пам'ять, зовнішні АЦП, ЦАП, пристрої вибірки–зберігання (ПВЗ), комутатори сигналів тощо [127, 128].

Але, враховуючи те, що в мікроконтролерах різних виробників окрім внутрішньої постійної і оперативної пам'яті є також АЦП з ПВЗ та комутатором, в багатьох випадках цих апаратних ресурсів вистачає для реалізації необхідних систем. Розмір пам'яті визначається конкретною реалізацією проєктованого пристрою. Застосування зовнішнього АЦП обґрунтовано лише необхідністю збільшення розрядності представлення сигналів та швидкодії [129].

Враховуючи зазначені міркування, здійснимо у відповідності до запропонованих математичних моделей та синтезованих структур розробку мікропроцесорних засобів для діагностування обмоток силового трансформатора.

#### **4.1 Мікропроцесорний засіб для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора на основі законів теплопередачі**

У відповідності до розробленої математичної моделі (підрозділ 2.1) та структури пристрою визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі (підрозділ 3.1) для технічної реалізації пристрою необхідно передбачити отримання інформації з сенсорів струму і температури трансформаторного масла. Оброблену інформацію за відповідною математичною моделлю інформацію необхідно

виводити як для локального аналізу в місці, де встановлений пристрій, так і на ПЕОМ оперативного персоналу, де виводиться інформація про найбільш важливі об'єкти, що задіяні в технологічному процесі. Також, необхідно передбачити в пристрої для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора використання клавіатури для контролю за роботою пристроєм і оперативного перепрограмування.

Для реалізації поставленої задачі застосуємо зазначену вище математичну модель, яка дозволяє визначати еквівалентне старіння ізоляції силового масляного трансформатора при короткочасних і довготривалих стрибках навантаження з урахуванням температури трансформаторного масла на різних рівнях бака трансформатора.

Опираючись на вищезгадані твердження та з врахуванням сучасних технологій створення технічних засобів, здійснимо реалізацію засобу для оцінки технічного стану ізоляції обмоток силового трансформатора на базі мікроконтролера типу STM32F723ZET6, використання якого є прийнятним для побудови подібних пристроїв.

На рисунку 4.1 зображена структурна схема пристрою, на якій введено позначення: 1 – сенсор струму трансформатора; 2 – сенсор температури масла трансформатора; 3 – перетворювач змінного струму в змінну напругу; 4 – нормуючий перетворювач; 5 – мікроконтролер; 6 – клавіатура; 7 – дисплей; 8 – блок узгодження сигналів для передачі інформації в систему моніторингу електрообладнання.

Структура пристрою є традиційною. Зазначимо лише, що в пристрої реалізовано циклічне опитування сенсорів 1 і 2 та обчислення залишкового ресурсу ізоляції обмоток масляного трансформатора по запрограмованій вище згадуваній математичній моделі. Дисплей та клавіатура використовуються як допоміжні засоби, які необхідні для введення початкових параметрів. Також на дисплеї відображається поточне значення залишкового ресурсу. Блок узгодження сигналів 8 забезпечує передачу даних з мікроконтролера 5 в систему збору даних та відображення інформації оперативному персоналу.

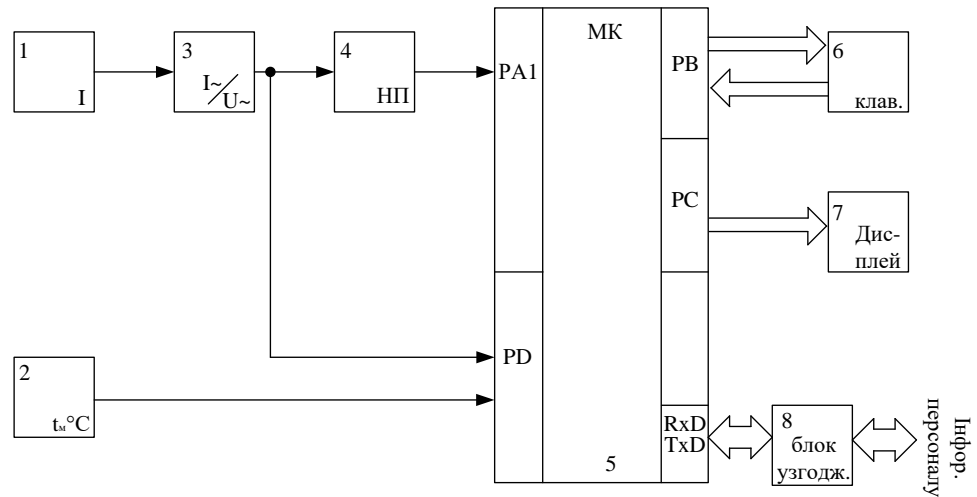


Рисунок 4.1 – Структура мікропроцесорного пристрою для оцінки ступеня теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора

Зупинимось детальніше на алгоритмі роботи пристрою для оцінки ступеня теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора, що зображений на рисунку 4.2. У блоках 1 – 5 здійснюється ініціювання пристрою, введення сталих та поточних даних режиму роботи - номінального струму, геометричних розмірів витка обмотки, перерізу витка, матеріалу витка, товщини ізоляції, класу ізоляції, кількості витків, часу інформування, відповідно до якого пристрій сповістить оперативний персонал про оцінку наближення до вичерпання ресурсу ізоляції. Здійснюється також розрахунок констант, необхідних для використання математичної моделі згідно [105]. Так, в блоці 4 проводиться розрахунок еквівалентної теплопровідності матеріалу одного шару провідників висотою в один провідник. Сюди входить матеріал провідників, ізоляція провідників і масляні канали між провідниками. Також в блоці 4 розраховується товщина пластини магнітопроводу, об'єм одного метра одного шару витків обмотки силового масляного трансформатора, термічний опір шару провідників і число Прандтля.

Еквівалентна теплопровідність всіх елементів в шарі провідника знаходиться по формулі згідно [105]:

$$\lambda = \frac{\delta_b}{R_T}, \quad (4.1)$$

де  $\delta_v$  – товщина всього шару матеріалу з урахуванням товщини металу, ізоляції і масляних каналів (м);  $R_T$  – термічний опір ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ).

Товщина половини пластини магнітопроводу визначається згідно [105] за виразом:

$$\delta = 2 \cdot AB + 2\delta_{iz} + 1.5\delta_m, \quad (4.2)$$

де  $AB$  – ширина провідника (м);  $\delta_{iz}$  – товщина ізоляції на одному провіднику (м);  $\delta_m$  – товщина масляного каналу між провідниками (м).

Об'єм металу провідника визначимо за формулою:

$$V = l_{пр} \cdot S_{пр}, \quad (4.3)$$

де  $l_{пр}$  – довжина провідника (м);  $S_{пр}$  – площа перерізу одного шару провідників обмотки ( $\text{м}^2$ ).

Формула для визначення числа Прандтля для трансформаторного масла має вигляд [105]:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (4.4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі при обтіканні поверхні провідника трансформаторним маслом ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ );  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості трансформаторного масла ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

У блоці 5 відбувається порівняння поточного значення струму з його номінальним значенням, блок 6 – відповідає за розрахунок тепловиділення згідно формули (2.7).

Значення поточної температури масла отримуємо з відповідного сенсора температури (блок 7 в структурі алгоритму). В блоці 8 здійснюється розрахунок коефіцієнта тепловіддачі [105].

В блоці 9 виконується розрахунок температури на краю і в середині обмотки згідно формули (2.6).

Після виконаних розрахунків результати вносяться у масиви змінних те-

температури та часу вимірювання (блок 10). Маючи поточне значення температури кожної секунди, легко згідно восьмиградусного правила старіння ізоляції розрахувати, який еквівалентний ресурс вичерпується кожної секунди. Даний розрахунок виконується в блоці 11. В блоці 12 обчислюється накопичуване значення еквівалентного старіння ізоляції згідно формули (2.22), що і характеризує процес старіння ізоляції обмоток.

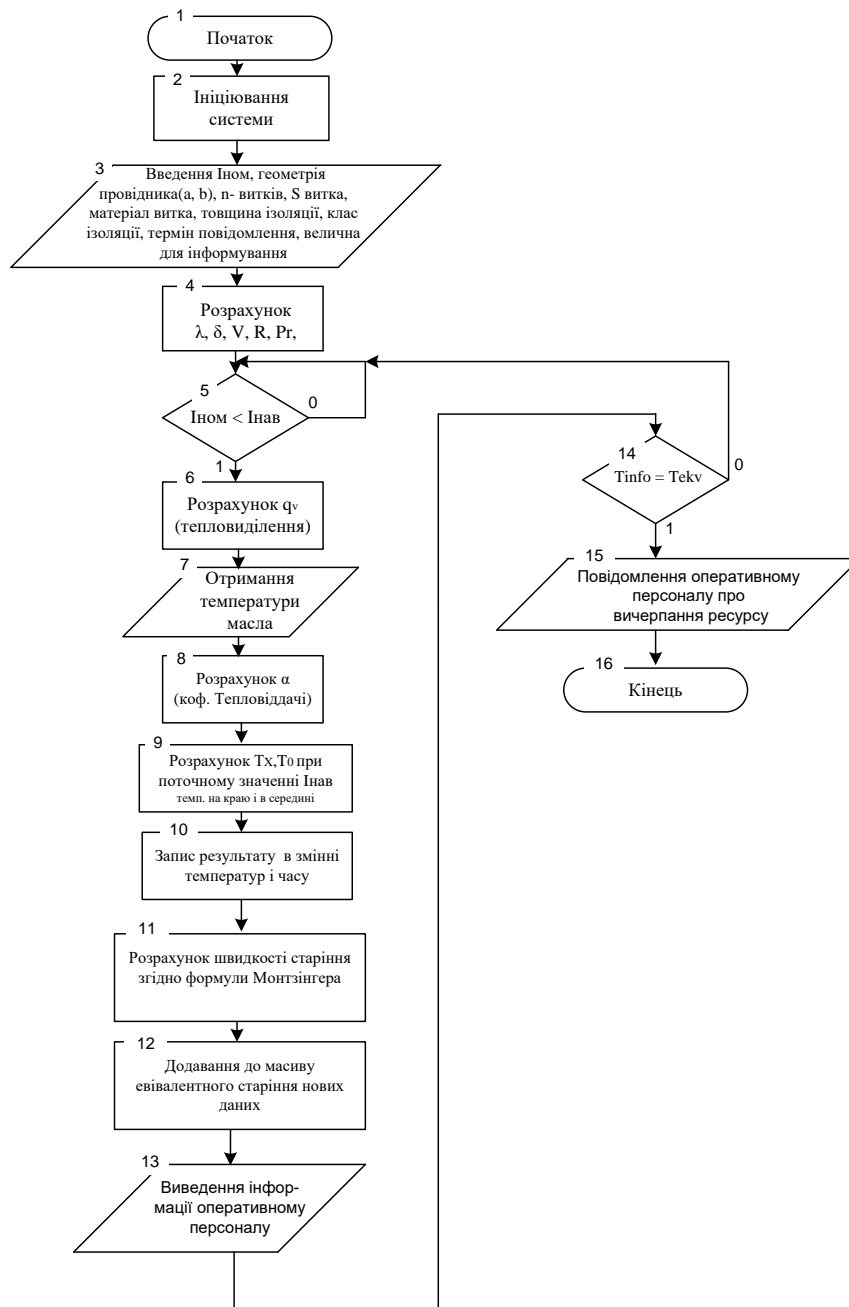


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для оцінки ступеню теплового старіння обмоток силового масляного трансформатора

Розрахована таким чином інформація щодо теплового старіння ізоляції обмоток силового трансформатора виводиться на екран пристрою та передається оперативному персоналу (блок 13). Порівняння еквівалентного значення відпрацьованого ресурсу ізоляції з введеним еталонним значенням здійснюється в блоці 14. У разі перевищення допустимої межі оперативний персонал інформується (блок 15) про можливість виникнення передаварійної ситуації в зв'язку з наближенням до вичерпання робочого ресурсу ізоляції силового трансформатора.

Зауважимо, що запропонований мікропроцесорний засіб зорієнтовано на використання сенсорів струму та температури, якими комплектуються силові трансформатори при введенні їх в експлуатацію, однак не є великою складністю застосування інших сенсорів. Наприклад, для вимірювання температури трансформаторного масла можливе використання цифрового сенсора температури Pt1000 RTD.

#### **4.2 Комп'ютерне моделювання отриманих моделей, засобів діагностування**

Здійснимо дослідження системи прогнозування температури обмотки силового масляного трансформатора при короткочасних стрибках у відповідності з розробленою математичною моделлю в роділі 2. Нагадаємо, що застосування цього методу прогнозування температури обмотки дозволяє спрогнозувати температуру обмотки і, відповідно, визначати швидкість старіння ізоляції. І, звичайно, як результат моделювання нас цікавить як буде мінятися температура при різних за величиною стрибках навантаження.

Скористаємось пакетом прикладних програм Matlab [130], який містить у своєму складі велику кількість підпрограм, що дозволяють вирішувати різні технічні задачі. Для візуального моделювання в Matlab скористаємось середовищем Simulink, яке дозволяє із стандартних блоків внутрішніх бібліотек створювати модель потрібного пристрою та виконувати відповідні

розрахунки [105]. На рисунку 4.3. зображена модель для визначення ступеня нагріву обмотки силового трансформатора. При моделюванні температура трансформаторного масла 80 °С.

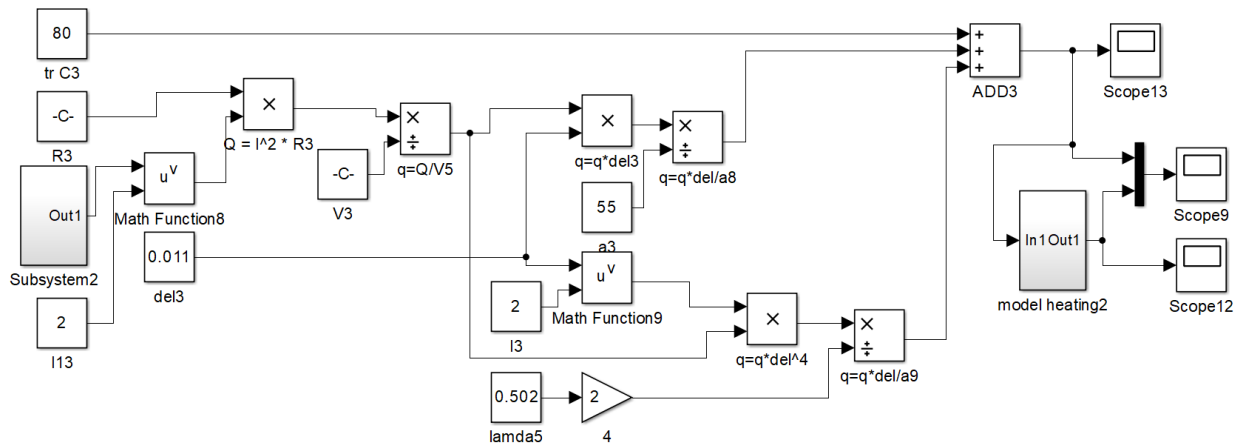


Рисунок 4.3 – Імітаційна модель для визначення температури нагріву обмотки силового масляного трансформатора в середині обмотки

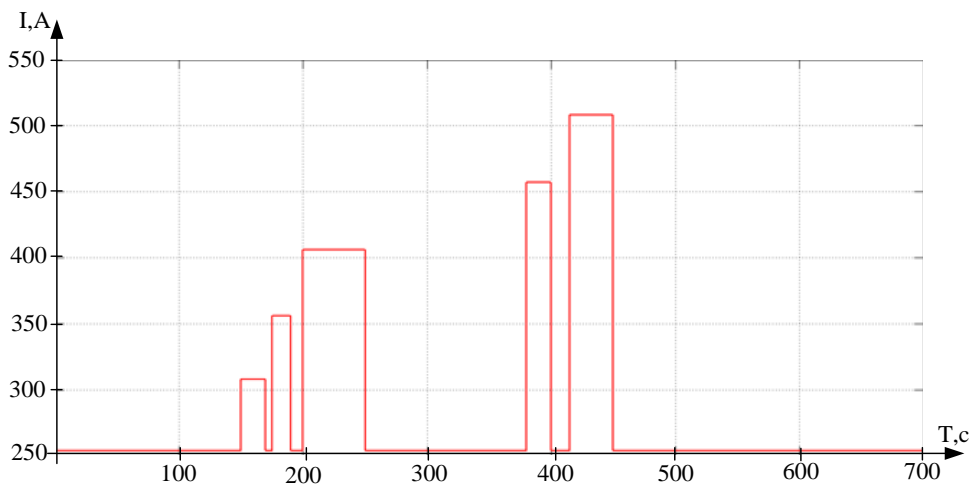


Рисунок 4.4 – Результати моделювання стрибків навантаження які подаються на вхід системи

Як відомо з моделі у підрозділі 2.1, температура в середині обмотки вище, тому необхідно здійснити комп'ютерне моделювання визначення ступеня нагріву на краю обмотки силового трансформатора.

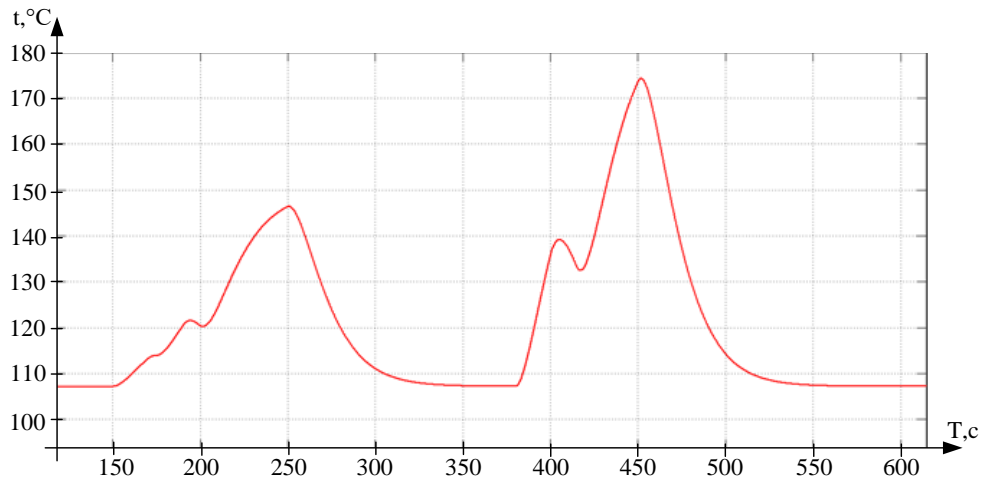


Рисунок 4.5 – Результати моделювання, що відображають зміну як температури в середині обмотки при різних значення струму з імітацією процесу нагріву і охолодження після стрибка навантаження

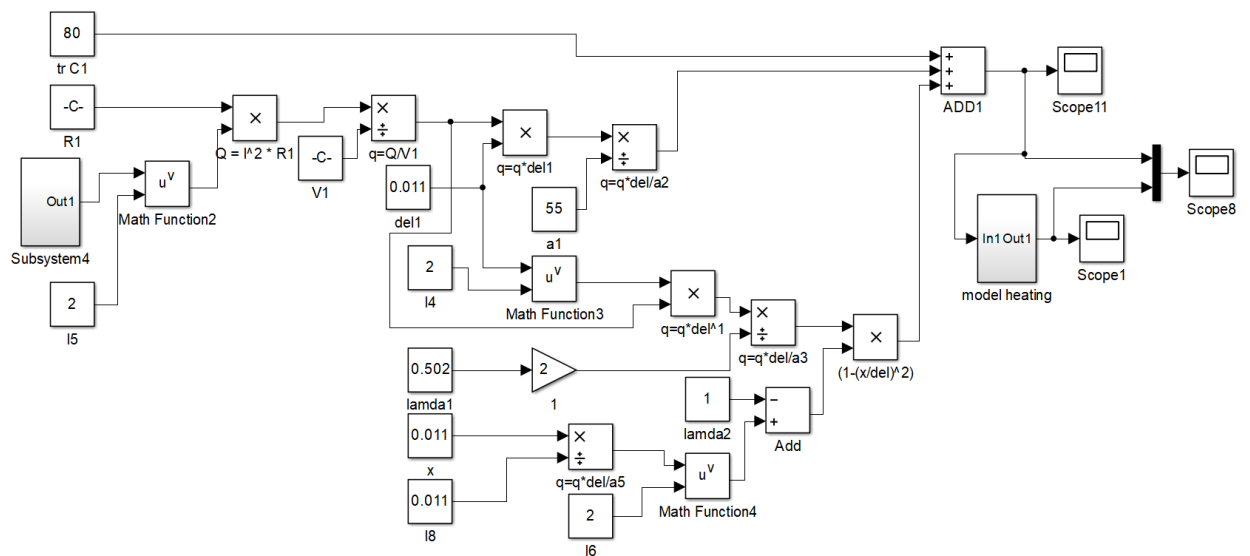


Рисунок 4.6 – Імітаційна модель для визначення температури нагріву обмотки силового масляного трансформатора на краю обмотки



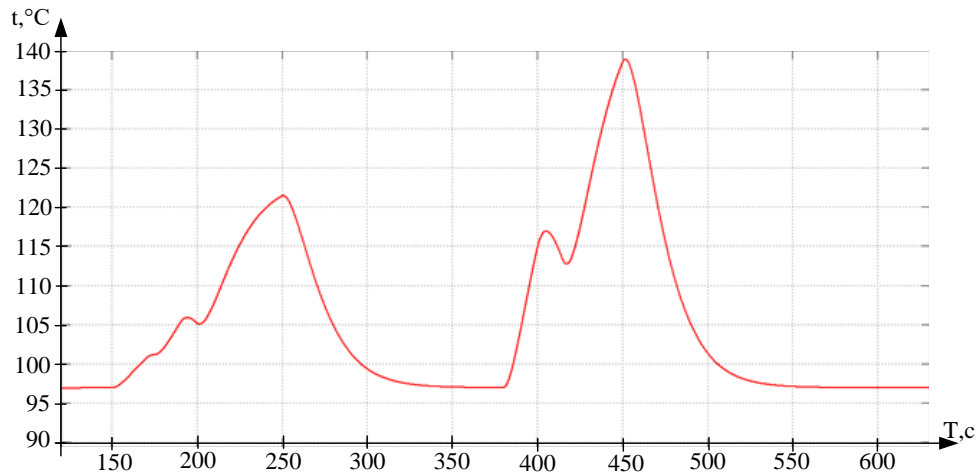


Рисунок 4.7 – Результати моделювання, що відображають температуру на краю обмотки при різних значеннях струму з імітацією процесу нагріву і охолодження після стрибка навантаження

### 4.3 Оцінка точності синтезованих засобів

Як зазначалось вище, для роботи пристрою діагностування залишкового ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора необхідно вимірювати значення струму, що протікає через обмотку трансформатора, та температуру трансформаторного масла. Похибки, які виникають в кожному елементі пристрою діагностування, а також наявність впливу зовнішніх факторів, обумовлюють похибку вимірювання залишкового робочого ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора.

Таким чином виникає потреба оцінки похибок вимірювальних каналів-вимірювання струму, температури трансформаторного масла. На рисунку 4.8 наведена функціональна схема каналів вимірювання сигналів пристрою для діагностування залишкового ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора та зазначені похибки, які виникають в ланках цих каналів.

Відповідно з [131] задача нормування загальної похибки вимірювання зводиться до нормування похибок вимірювання вимірювальних каналів мікропроцесорного пристрою.

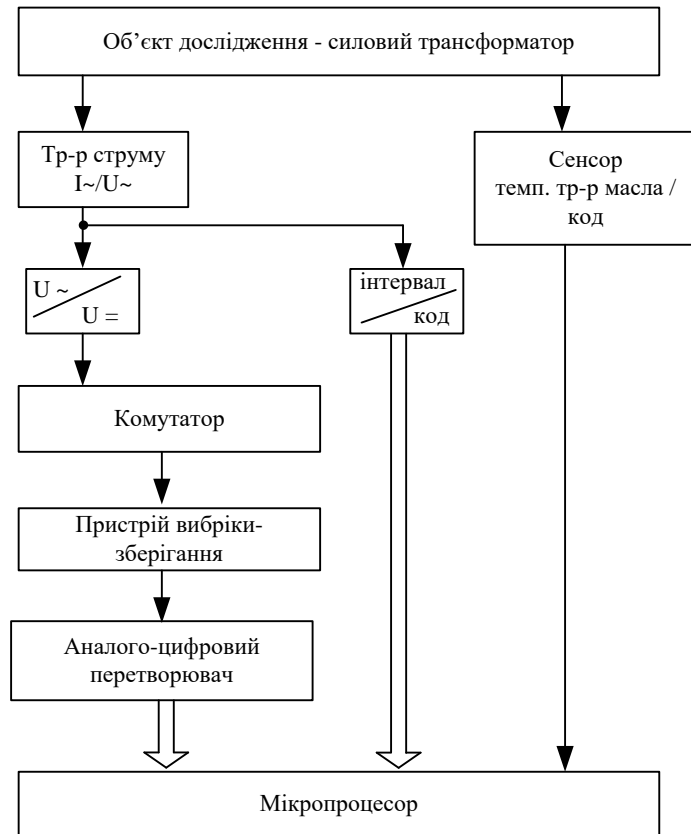


Рисунок 4.8 – Функціональна схема вимірювальних каналів пристрою для діагностування стану ізоляції силового трансформатора

Впливовими складовими похибками вимірювальних каналів мікропроцесорного пристрою для діагностування залишкового ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора є:

- похибки вимірювань струму силового масляного трансформатора. Вимірювання струму здійснюється за допомогою трансформатора струму;
- похибка вимірювання температури трансформаторного масла;
- похибка від перетворення сигналів з сенсора струму в постійну напругу; • похибка квантування в АЦП;
- інші похибки різної природи походження, фактори навколишнього середовища.

### 4.3.1 Вибір сенсорів температури та їх похибки

Враховуючи сучасні досягнення в області побудови сенсорів для вимірювання температури [132–136], в якості сенсорів температури ізоляції обмоток та температури навколишнього середовища доцільно застосувати цифрові температурні контролери фірми Dallas Semiconductor [134–136], зокрема це може бути цифровий сенсор температури, наприклад, Pt1000 RTD [135, 136].

Згідно з технічною документацією температурний діапазон роботи контролера Pt1000 RTD складає від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  при похибці від  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $\pm 0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$  в залежності від діапазону вимірювання температури. В діапазоні від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  похибка вимірювання температури складає  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в діапазонах від  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  похибка лінійно зростає від  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $\pm 0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Зауважимо, що температура навколишнього середовища може змінюватися в діапазоні від  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а найвища температура трансформаторного масла може приймати значення в діапазоні від  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , хоча нижня межа реальної робочої температури становить не менше  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Оскільки температура трансформаторного масла завжди буде завжди більше за  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тому доцільно знайти похибку в додатній частині вимірюваного діапазону, а похибку вимірювань прийняти  $\Delta_+ = 0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , її приведення до меж вимірювань значення

$$\gamma_+ = \frac{\Delta_+}{120} = \frac{0,55}{120} = 0,0045\% .$$

Зрозуміло, що при температурі  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  приведення значення похибки вимірювання складає

$$\gamma_+ = \frac{\Delta_+}{80} = \frac{0,55}{80} = 0,0045\% .$$

Отже, для вимірювання температури трансформаторного масла

приймаємо найбільшу похибку, яка становить  $\gamma_m = 0,0045 \%$ .

Оскільки контролер вимірювання температури є цифровим, то закон розподілу цієї похибки переважно рівномірний [131]. Тоді СКВ приймає значення

$$\sigma_+ = 0,0045 / \sqrt{3} = 0,0025\% ,$$

#### 4.3.2 Вибір сенсорів струму та напруги і їх похибки

Для введення в мікропроцесорний пристрій сигналу струму трансформатора, необхідно застосовувати вимірювальний високовольтний трансформатор струму, оскільки при напрузі електричної мережі більше 10 кВ обов'язковим є забезпечення гальванічної розв'язки. Як відомо з [137] похибки трансформатора струму обумовлені наявністю струму намагнічування. В таблиці 4.1 наведені граничні значення струмової і кутової похибок трансформатора струму.

Потрібно зазначити, що похибки вимірювальних трансформаторів вважаються чисто мультиплікативними [131, 138], тобто клас точності трансформатора вказується у вигляді значення відносної похибки. Абсолютні похибки вимірювань трансформатора можна визначити з виразу

$$\Delta_T = \gamma_T \cdot x , \quad (4.5)$$

де  $x$  - виміряна величина;  $\gamma_T$  - клас точності (відносна похибка)

Відносна кутова похибка вимірювальних трансформаторів визначається по відношенню до максимального кута зсуву фаз  $180^\circ$  з виразу

$$\gamma = \frac{\Delta^\circ}{180^\circ} \cdot 100\% . \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1 – Струмові і кутові похибки вимірювальних трансформаторів струму

Клас точності ТС	Первинний струм, % номінального	Найбільша похибка			Вторинне навантаження, % номінального, при $\cos \varphi_2=0,8$
		струмова %	кутова ...'	срад	
0,2	5	$\pm 0,75$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	25-100
	10	$\pm 0,50$	$\pm 20$	$\pm 0,6$	
	20	$\pm 0,35$	$\pm 15$	$\pm 0,4$	
	100-200	$\pm 0,20$	$\pm 10$	$\pm 0,3$	
0,5	5	$\pm 1,5$	$\pm 90$	$\pm 2,5$	
	10	$\pm 1,0$	$\pm 60$	$\pm 1,7$	
	20	$\pm 0,75$	$\pm 45$	$\pm 1,35$	
	100-200	$\pm 0,5$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
1	5	$\pm 3,0$	$\pm 180$	$\pm 5,4$	
	20	$\pm 1,5$	$\pm 90$	$\pm 2,7$	
	100-120	$\pm 1,0$	$\pm 60$	$\pm 1,8$	

Проаналізувавши таблицю 4.1, можна зробити висновок, що для вимірювального трансформатора струму класу точності 0,2 струмова похибка становить  $\gamma_{ТС} = 0,75 \%$ , а кутова похибка  $\Delta k_{ТС} = \pm 30'$  чи у відносних одиницях  $\gamma_{k_{ТС}} = 0,046 \%$ .

Потрібно зазначити, що окрім традиційно використовуваних вимірювальних трансформаторів струму існують інші розробки, які можливо застосувати для розв'язання задач вимірювання сигналів високовольтної електричної мережі.

Так, в роботі [139] фірмою “НИИЭМ” пропонуються сенсори струму типу ДИТ і ДТХ, які мають гальванічну розв'язку та з високою точністю передають форму сигналу при вимірюванні постійних, змінних та імпульсних струмів. Сенсори являють собою магнітопровід з компенсаційною обмоткою та електронною схемою обробки сигналу.

### 4.3.3 Похибка перетворювачів синусоїдального сигналу в сигнал постійного струму

Для здійснення розрахунків згідно з розробленою математичною моделлю (підрозділ 2.1) в мікропроцесорній пристрій повинна поступати інформація про діючі значення струму. Як відомо з [140], діюче значення синусоїдального сигналу пропорційне його середньому значенню. В електричних мережах в більшості випадків несинусоїдальність напруги

незначна, тому прийmemo, що несинусоїдальність майже не впливає на співвідношення діючого і середнього значень напруги.

Згідно [141] трансформатор струму включений на активний опір, на якому відбувається спад напруги, пропорційний струму вторинної обмотки цього трансформатора. Для приведення амплітуди напруги, що знімається з резистора навантаження трансформатора струму, до значень, допустимих для АЦП, також застосуємо резистивний дільник.

Похибка масштабування резистивного дільника містить похибку, обумовлену невідповідністю значення опору номінальному, та температурну похибку. Згідно з [141] температурну похибку можна звести до мінімуму шляхом використання прецизійних термостабільних резисторів.

Виходячи з наведеного можна знехтувати похибкою перетворювача струму в напругу, який реалізовано на резисторі і використовується разом з трансформатором струму.

Зазвичай, перетворювачі сигналів поєднують функції випрямляча і фільтра. Оскільки швидкодія мікропроцесорного пристрою для визначення залишкового реурсу ізоляції силового трансформатора невисока, то випрямляч і фільтр сигналу доцільно побудувати з використанням операційних підсилювачів [142], більшість з яких містять послідовно з'єднані одно- або двонапівперіодний операційний детектор та фільтр нижніх частот [143].

Щоб забезпечити високу точність перетворювача сигналів до його опорів висуваються такі ж вимоги, як і до опорів резистивного дільника. Але існує випадкова складова похибки, яка присутня у формі вихідного сигналу (рисунок 4.9). Дана похибка зумовлена схемотехнічною реалізацією перетворювача сигналів.

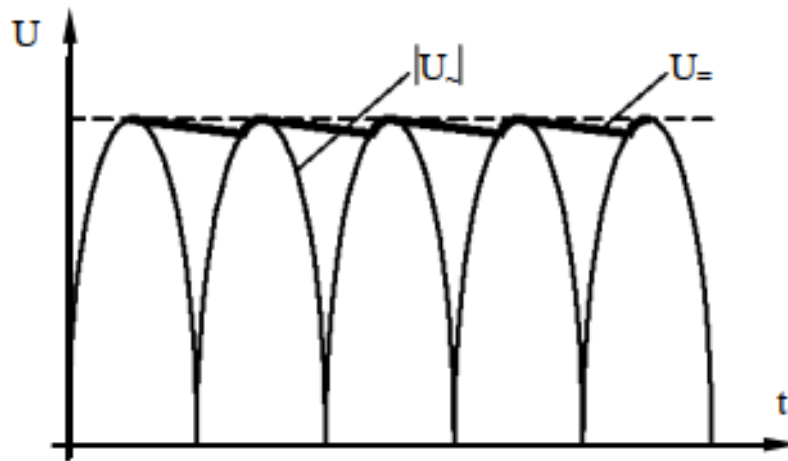


Рисунок 4.9 – Форми сигналів, що ілюструють роботу перетворювача сигналів

З рисунка 4.9 видно що, в формі вихідного сигналу перетворювача спостерігаються незначні пульсації, які спричинені фізичними процесами, а саме процесом заряду та розряду конденсатора. Випадковість похибки обумовлена тим, що процеси перетворення в перетворювачі несинхронізовані з АЦП, тобто квантування сигналу може відбуватись в будь-який час.

Як відомо з [143], закон розподілу цієї похибки наближається до гамма-розподілу [144-146] і описується математичними виразами

$$p(\delta_p) = \begin{cases} 0, & \delta_p \leq 0, \\ C_\gamma \cdot \delta_p^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\beta\delta_p}, & \delta_p > 0, \alpha > 0, \beta > 0, \end{cases} \quad (4.7)$$

де  $\delta_p$  – похибка вимірювання напруги, зумовлена пульсаціями вихідного сигналу перетворювача;  $C_\gamma$ ,  $\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти гаммарозподілу, які задають

так, щоб виконувалась умова  $\int_0^\infty p(\delta_p) d\delta_p = 1$  з формули

$$C_\gamma = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}. \quad (4.8)$$

Математичне сподівання похибки вимірювання напруги, що зумовлена пульсацією сигналу, визначається з виразу

$$m(\delta_p) = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (4.9)$$

#### 4.3.4 Оцінювання похибки квантування АЦП

Згідно з [147, 148] похибка квантування аналого-цифрового перетворення містить дві складові. Динамічна похибка обумовлена квантуванням вхідної величини за часом. Її можна значно зменшити, використавши пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ), який обмежує зміну вхідного сигналу в процесі його перетворення в код. В проектуваному мікропроцесорному пристрої частота вихідного сигналу не перевищує 200 Гц. Отже, застосовуючи сучасні АЦП [149], які виконані в одному корпусі з ПВЗ і мають до 16 двійкових розрядів, можна досягти часу перетворення менше 2 мкс. Це дає змогу при використанні таких АЦП знехтувати динамічною похибкою. Слід зазначити, що використання мікроконтролерів STM фірми STMicroelectronics, які містять 12-розрядні АЦП з ПВЗ, дозволяє в інтегральному виконанні вирішити проблему аналого-цифрового перетворення сигналів. Похибка квантування, в свою чергу, складається з інструментальної похибки АЦП та похибки цифрового представлення. Інструментальна похибка виникає внаслідок наявності шумів у вузлах АЦП. Як зазначено в технічній документації виробника АЦП інструментальна похибка має значення, якими можна знехтувати.

Похибка квантування обумовлена скінченною кількістю рівнів, на які розбивається діапазон вимірювання і залежить від ширини цього діапазону та розрядності АЦП. Ця похибка може бути описана прямокутним законом розподілу [147], що відповідає однаковій густині ймовірності похибки квантування в межах  $\pm h/2$ , де  $h$  – крок квантування. Величина кроку жорстко пов'язана з максимальним значенням вхідної напруги АЦП та кількістю двійкових розрядів АЦП

$$h = \frac{U_{Dmax}}{2^n}, \quad (4.10)$$



де  $U_{Dmax}$  – максимальне значення вхідної напруги АЦП;  $n$  – кількість розрядів АЦП.

Абсолютна похибка квантування розраховується з виразу:

$$\Delta_{DI} = \frac{I_{max}}{2^{n+1}}, \quad (4.11)$$

де  $I_{max}$  – максимальне значення струму, яке необхідно вимірювати.

Середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання струму

$$\sigma_{DI} = \frac{I_{max}}{2^{n+1} \cdot \sqrt{3} \cdot U_I}, \quad (4.12)$$

де  $U_I$  – напруга на виході сенсора напруги.

Закон розподілу похибки квантування при вимірюванні струму:

$$p(\Delta_{DI}) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{I_{max}}, \quad \Delta_{DI} \in \left[ -\frac{U_{max}}{2^{n+1}}, \frac{U_{max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (4.13)$$

Враховуючи те, що найбільше значення струму  $I_{max} = 254$  А, то при застосуванні мікроконтролера фірми STMicroelectronics, який містить 12-розрядний АЦП, отримаємо такі значення абсолютних  $\Delta$  та відносних  $\varepsilon$  похибок:

$$\Delta_{DI} = \frac{254}{2^{13}} = 0,124 \text{ А}; \quad \varepsilon_{DI} = \frac{0,031}{254} \cdot 100\% \approx 0,012\%;$$

#### **4.4 Оцінювання вірогідності контролю стану ізоляції обмоток силового масляного трансформатора за помилками першого і другого роду**

Синтезованому мікропроцесорному пристрою для визначення залишкового ресурсу ізоляції силових масляних трансформаторів, властиві помилки першого і другого роду [150]. Під помилкою першого роду  $N_1$  будемо

розуміти ситуацію, коли приймається рішення про повну витрату ресурсу ізоляції силового трансформатора, але насправді об'єкт діагностування знаходиться в справному стані. Тоді помилкою другого роду  $H_2$  буде рішення про справний стан ізоляції силового трансформатора, у той час ресурс ізоляції повністю вичерпаний.

Причиною помилок першого та другого роду як правило є наявність граничних параметрів, за якими здійснюється діагностування стану об'єкту. Діагностування ізоляції силового трансформатора зводиться до визначення його терміну служби, тобто граничним параметром є нормований термін служби. Позначимо його  $\tau$ , а відповідне йому граничне значення  $\tau_0$ . Позначимо відповідно до параметра  $\tau$   $D_1$  – справний стан ізоляції силового трансформатора, а  $D_2$  – її дефектний стан. В якості правила прийняття рішення, у якому зі станів знаходиться об'єкт діагностування, приймемо правило виду

$$\begin{cases} \tau < \tau_0 \Rightarrow \tau \in D_1, \\ \tau \geq \tau_0 \Rightarrow \tau \in D_2. \end{cases} \quad (4.14)$$

Як відомо, завжди  $\tau, \tau_0 \geq 0$ . Для вказаного правила виникає питання визначення параметра  $\tau_0$  оскільки чітко границі між станами  $D_1$  і  $D_2$  не існує.

Як правило на практиці, немає чітко вираженої межі поділу станів  $D_1$  і  $D_2$ . З [150] відомо, що області станів  $D_1$  і  $D_2$  перетинаються, і тому принципово неможливо вибрати значення  $\tau_0$ , при якому правило (4.14) не давало б помилкових рішень. Завдання полягає у виборі  $\tau_0$ , який має бути у якомусь понятті найкращим. Для розв'язання цієї задачі використаємо метод мінімального ризику [150–152].

Використаємо позначення  $P_1$  - апіорна імовірність діагнозу  $D_1$  справного стану ізоляції силового трансформатора,  $P_2$  - апіорна імовірність діагнозу  $D_2$  дефектного стану ізоляції, які розраховуються зі статистичних даних. Потрібно зазначити, що обрані апіорні імовірності можуть відрізнятися в різних енергетичних підприємствах.

Оскільки наслідки помилок першого і другого роду призводять до різних цін витрат (збитків), тому потрібно приписувати "ціни"  $C_1$  і  $C_2$  цим помилкам.

Потрібно зазначити, що ціна  $C_1$  відповідає витратам на проведення додаткових і зайвих профілактичних заходів, а ціна  $C_2$  пов'язана з витратами на ліквідацію аварії і вартістю збитків від недовідпуску електроенергії споживачам. Стає очевидним, що чим більша потужність силового масляного трансформатора, тим більше  $C_2$  і  $C_2 \gg C_1$ .

З [150–152] відомо що, точність роботи мікропроцесорного пристрою за помилками першого  $H_1$  і другого  $H_2$  роду з врахуванням цін  $C_1$  і  $C_2$  може характеризуватися величиною середнього ризику

$$R = C_1 P(H_1) + C_2 P(H_2) = C_1 P_1 \int_{\tau_0}^{\infty} f(\tau / D_1) d\tau + C_2 P_2 \int_{-\infty}^{\tau_0} f(\tau / D_2) d\tau, \quad (4.15)$$

де  $P(H_1)$  і  $P(H_2)$  – імовірності помилок першого і другого роду відповідно.

За методом мінімального ризику, граничне значення  $\tau_0$  визначається з умови мінімуму середнього ризику, яка для (4.14) має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 = \frac{C_2 P_2}{C_1 P_1} > 0; \\ \lambda(\tau_0) = \frac{f(\tau_0 / D_1)}{f(\tau_0 / D_2)}; \\ \lambda(\tau_0) = \lambda_0; \end{array} \right. \quad (4.16)$$

В залежності від вигляду функцій  $f(\tau_0/D_1)$  і  $f(\tau_0/D_2)$  система (4.15) може мати два і більше розв'язків (точок екстремуму)  $\tau_0$ . При одномодальних кривих [150] точок екстремуму дві, причому точка мінімуму  $\tau_0$  знаходиться в діапазоні

$$\bar{\tau}_1 < \tau_0 < \bar{\tau}_2, \quad (4.17)$$

де  $\tau_1$  – точка максимуму функції  $f(\tau/D_1)$ , а  $\tau_2$  – точка максимуму функції

$f(\tau/D_2)$ .

Перевірка точки екстремуму на мінімум в загальному випадку здійснюється з умови

$$\frac{f'(\tau_0/D_1)}{f'(\tau_0/D_2)} < \frac{C_2 P_2}{C_1 P_1} \quad \text{або} \quad \frac{f'(\tau_0/D_1)}{f'(\tau_0/D_2)} < \lambda_0 \quad (4.18)$$

Визначення математичних виразів густин розподілів  $f(\tau/D_1)$ ,  $f(\tau/D_2)$  пов'язане з великим терміном експлуатації електрообладнання та великою кількістю експериментальних досліджень в виробничих та лабораторних умовах. Тому отримати відповідні статистичні значення не є простим завданням.

Використаємо припущення, що вид густини розподілу  $f(\tau/D_1)$ ,  $f(\tau/D_2)$  відомий після статистичного опрацювання первинної інформації [153] і перевірки, по критерію  $\chi^2$  Пірсона [154]. Так в роботі [155] показано, що одним із найпоширеніших видів густини розподілу параметра  $\tau$ , що використовуються в техніці високих напруг для аналізу роботи високовольтного електрообладнання, є гамма-розподіл.

За такої умови будемо позначати  $\bar{\tau}_1, \sigma_1, \bar{\tau}_2, \sigma_2$  відповідно математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення справного  $D_1$  і несправного  $D_2$  станів робочого ресурсу ізоляції силового трансформатора. Дані характеристики будуть відомі після статистичного опрацювання інформації.

Тому для гамма-розподілу, який описується функцією виду [156] за умови, що  $\tau \geq 0$ ,

$$f(\tau) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \tau^{a-1} \exp(-b\tau), \quad (4.19)$$

де  $a > 0$  – параметр “форми”,  $b > 0$  – параметр масштабу,  $\Gamma(a)$  – гамма-функція, яка визначається

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt. \quad (4.20)$$

З виразу (4.18) отримаємо

$$f(\tau_0/D_1) = \frac{b_1^{a_1}}{\Gamma(a_1)} \tau_0^{a_1-1} \exp(-b_1 \tau_0); \quad (4.21)$$

$$f(\tau_0/D_2) = \frac{b_2^{a_2}}{\Gamma(a_2)} \tau_0^{a_2-1} \exp(-b_2 \tau_0). \quad (4.22)$$

Використовуючи властивості гамма-розподілу [156]  $\bar{\tau} = a/b$  та  $\bar{\tau} = a/b^2$ , представимо параметри  $a_1, b_1, a_2, b_2$  через відомі  $\bar{\tau}_1, \sigma_1, \bar{\tau}_2, \sigma_2$

$$a_1 = (\bar{\tau}_1)^2 / \sigma_1^2; \quad (4.23)$$

$$b_1 = \bar{\tau}_1 / \sigma_1^2; \quad (4.24)$$

$$a_2 = (\bar{\tau}_2)^2 / \sigma_2^2; \quad (4.25)$$

$$b_2 = \bar{\tau}_2 / \sigma_2^2; \quad (4.26)$$

З формул (4.15), (4.20) та (4.21) випливає

$$\lambda_0 = \frac{f(\tau_0/D_1)}{f(\tau_0/D_2)} = \frac{b_1^{a_1} \Gamma(a_2)}{b_2^{a_2} \Gamma(a_1)} \tau_0^{a_2-a_1} \exp[(b_2 - b_1) \tau_0] \quad (4.27)$$

або

$$\tau_0^{a_1-a_2} \exp[(b_2 - b_1) \tau_0] = \lambda_0 \frac{b_2^{a_2} \Gamma(a_1)}{b_1^{a_1} \Gamma(a_2)}. \quad (4.28)$$

Очевидно, що вираз (4.27) є рівнянням одного невідомого  $\tau_0$ . Після його розв'язання необхідно вибрати потрібне значення  $\tau_0$ , що задовольняє умову (4.16). Підставляючи знайдене значення  $\tau_0$  у вираз (4.14), отримаємо значення ризику, що характеризує точність роботи мікропроцесорного пристрою визначення залишкового ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора з урахуванням цін помилок першого і другого роду.

Потрібно додати, що аналогічним шляхом можна визначити граничний параметр будь-якого іншого імовірнісного розподілу цього параметра, що може бути визначений в результаті обробки експлуатаційної статистики силових трансформаторів.

#### **4.5 Висновки по матеріалам четвертого розділу**

1. Розроблено алгоритм та мікропроцесорний засіб для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора на основі законів теплопередачі, в основу якого покладено розроблена математична модель в розділі 2.1.

2. Розроблено алгоритм та мікропроцесорний засіб для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора за нечіткою моделлю, в основу якого покладено розроблена математична модель в розділі 2.2

3. Проведено моделювання у середовищі Matlab 8.0.0 розробленої математичної моделі у розділі 2.1, який дозволяє перевірити адекватність моделі для різних умов навантаження.

4. Було проведена оцінка точності синтезованих засобів, вибір засобів вимірювання струму і напруги. Також був здійснений аналі похибок при вимірюванні температури і струму відповідних сенсорів.

5. Проведено оцінювання вірогідності контролю стану ізоляції обмоток силового масляного трансформатора з помилок першого і другого роду. Отримано значення ризику, що характеризує точність роботи мікропроцесорного пристрою визначення залишкового ресурсу ізоляції силового масляного трансформатора з урахуванням цін помилок першого і другого роду.

Результати, представлених у четвертому розділі, отримані внаслідок дослідження, опубліковані в роботах [157] автора дисертації.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень розв'язано науково-технічну задачу з підвищення надійності функціонування обмоток силових трансформаторів. Отримано такі наукові та практичні результати:

У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Уперше розроблено математичну модель для оцінки температури обмоток силового трансформатора шляхом визначення кількості енергії, що виділяється у витках обмотки, з урахуванням віддачі тепла трансформаторному маслу, яке рухається з певною швидкістю, та геометрії проводу обмоток, що дозволяє відслідковувати короточасні стрибки навантаження та враховувати їх при оцінці старіння ізоляції обмоток силового трансформатора та спрацьовуванні їх залишкового робочого ресурсу.

2. Удосконалено на основі теорії нечітких множин математичну модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі короточасних стрибків навантаження, яка на відміну від відомих дозволяє підвищити точність оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток шляхом врахування додаткових факторів впливу.

3. Удосконалено на основі теорії нечітких множин математичну модель для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження, яка на відміну від відомих дозволяє підвищити точність оцінки залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток шляхом врахування додаткових факторів впливу.

4. Розроблено математичну модель на основі нейронної мережі для визначення допустимої тривалості ввімкнення силового сухого трансформатора в режимі перевантаження, з налаштуванням параметричної оптимізації нечіткої моделі для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження та з врахуванням додаткових факторів впливу.

У галузі практичного застосування:

1. На основі математичної моделі для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора згідно законів теплопередачі, розроблено алгоритм та мікропроцесорний пристрій, який дозволяє прогнозувати залишковий ресурс ізоляції трансформатора.

2. З використанням нечіткої математичної моделі для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора, що працює в режимі перевантаження розроблена структурна схема пристрою, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє враховувати вплив зовнішніх факторів, що підвищує точність прогнозування залишкового ресурсу.

3. На основі математичних моделей для визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі розроблена структурна схеми пристроїв, які легко реалізуються на програмованих логічних інтегральних схемах.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] НОРМИ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020.
- [2] Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Проблема и виды износа электрооборудования // Путь науки, 2015. №2. С. 36–38
- [3] Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ 20911–89. – [Введ. 1991-01-01]. – М. : Изд-во Стандартиформ, 2009. – 13 с.
- [4] Кутин В. М. Диагностирование электрооборудования электрических систем /В. М. Кутин, В. И. Брейтбурд. – К. : УМК ВО, 1991. – 104 с.
- [5] Техническое диагностирование устройств промышленной энергетики после длительной эксплуатации / С. В. Сафронов, О. К. Прохода, В. А. Медеров, А. В. Никитин // Промышленная энергетика. – 1992. – №10. – С.33–36.
- [6] Чичев С.И., Глинкин Е.И. Новое применение оптического волокна в температурном мониторинге обмоток силового трансформатора // Вестник Тамбовского Университета. Серия Естественные и технические науки / Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина. – Тамбов, 2011. – Т. 16, вып. 2 – С. 493 – 496.
- [7] Haque, N., Ittiarah, J. V., Gangopadhyay, T.K., et al.: ‘Temperature monitoring of power transformer using fiberoptic sensor’, In Power, Dielectr. Energy Manag. NERIST (ICPDEN), 2015 1st Conf., pp. 1–5.
- [8] M. A. Ansari, D. Martin and T.K. Saha, "Investigation of Distributed Moisture and Temperature Measurements in Transformers Using Fiber Optics Sensors," IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 34, no. 4, 2019, pp. 1776-1784.
- [9] Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А.И. Хальясмаа и др. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2015. 64 с.

[10] Макаревич Л. В. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей / Л. В. Макаревич, Л. Н. Шифрин, М. Е. Алпатов // Известия Академии наук. Энергетика. – 2008. – № 1. – С. 45–69.

[11] О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей / М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов, Ю. А. Дементьев и др. // Электрические станции. – 2005. – № 11. – С. 69–75.

[12] Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей // Изв. Акад. наук. Энергетика. 2008. № 1. С. 45-69.

[13] Соколов В.В. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов / В.В. Соколов, В.А. Лукащук // Соколов В.В. Избранные труды / Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной. – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. С. 22–30.

[14] С.П. Конограй. Применение модели старения твёрдой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации, Електротехніка і електромеханіка. — 2010. — № 1. — С. 43-45. — Бібліогр.: 9 назв. — рос.

[15] М. М. Файзиев, Б. Б. Мавланов, Н. А. Курбонов [и др.]. Тепловой износ изоляции силового трансформатора — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 6 (110). — С. 219-221. — URL: <https://moluch.ru/archive/110/26602/>

[16] Петров В.С. Разработка математической модели прогнозирования надежности силовых трансформаторов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF-05TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05TVN215.

[17] Vasin, V.P. Development of methods of evaluation of power transformer insulation aging taking into account random exploitation factors / V.P.

Vasin, A.P. Dolin // Proceedings of CIGRE Southern Africa Regional conference. - 2009. - 6 p.

[18] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. - М.: Энергоиздат, 2004. - 616 с.

[19] Федоров М.М., Лужнев А.И., Боев А.Е. Оценка сроков службы изоляции электрических машин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, вип. 10 (180). Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. С. 200–203

[20] Розводюк М. П. Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Випуск 3/2019 (47). – С.35-47. DOI:10.30929/2072-2052.2019.3.47.35-47.

[21] Розводюк М. П. Синтез структури пристрою для контролю технічного стану силового масляного трансформатора [Електронний ресурс] / М. П. Розводюк, С. С. Левашов // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2019), м. Вінниця, 11-30 травня 2019 р. – 2019. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/view/6231>.

[22] S. Ghoneim, “The Degree of Polymerization in a Prediction Model of Insulating Paper and the Remaining Life of Power Transformers,” in MDPI Energies, vol. 14, no. 3, pp. 1-14, Jan. 2021.

[23] J. S. N’cho, I. Fofana, Yazid Hadjadj, A. Beroual, “Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers,” in MDPI Energies, vol. 9, no. 5, pp.1-29, May 2016.

[24] Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials, IEC 60450, 2007.

[25] Романов, А. С. Анализ и классификация известных методов и средств диагностики силовых масляных трансформаторов — Текст :

непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 22 (312). — С. 138-142.  
— URL: <https://moluch.ru/archive/312/70856/>.

[26] A. M. Aciu, M. C. Nițu, M. Nicola, C. I. Nicola, F. Lăzărescu, “Complementary Analysis of the Degree of Polymerization Based on Chemical Markers 2-Furaldehyde and Methanol Using the Fuzzy Logic,” XXI-st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Burgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-6.

[27] M. Nicola, M. Duță, M. C. Nițu, A. M. Aciu, C. I. Nicola, “Improved System Based on ANFIS for Determining the Degree of Polymerization,” in *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, vol. 5, no. 6, pp. 664-675, Nov. 2020.

[28] A. M. Aciu, C.I. Nicola, Marcel Nicola, M.C. Nițu, “Complementary Analysis for DGA Based on Duval Methods and Furan Compounds Using Artificial Neural Networks”, in *MDPI Energies 2021*, vol. 14, no. 3, pp. 1-22, Jan. 2021.

[29] Козлов В.К., Сабитов А.Х. СТЕПЕНЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018; 20(9-10):34-38. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38>.

[30] S. Ghoneim, “Determination of Transformers’ Insulating Paper State Based on Classification Techniques,” in *MDPI Processes*, vol. 9, no. 3, pp.1-12, Feb. 2021.

[31] Нормирование показателей для оценки износа изоляции обмоток силовых трансформаторов / М. Ю. Львов, М. И. Чичинский, Ю. Н. Львов и др. // *Электрические станции*. – 2002. – № 7. – С. 51–54.

[32] Эксплуатация силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей износа изоляции обмоток /В. Б. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов, Л. Н. Шифрин // *Электрические станции*. – 2004. – № 2. – С. 63–65.

[33] Львов М.Ю. О развитии системы нормативно-технической документации для оценки технического состояния силовых трансформаторов. *Электрические станции*, 2009, № 3, с. 53-55.

[34] Experiences from on-site transformers oil reclaiming/ O. Berg, K. Herdlevær, M. Dahlung a.o. – Session 2002 CIGRE.

[35] Pantic V.A. Extension of the lifetime and increase of the transformer operation safety on the grid / V.A. Pantic, D.V. Pantic, B. Microsavljjevic. – Session 2002 CIGRE.

[36] Шинкаренко Г. В. Методы выявления дефектов силовых трансформаторов / Г. В. Шинкаренко, В. А. Карачун, М. А. Юхименко // *Электрические станции*. – 2005. – № 9. – С. 52–62.

[37] Василевский В.В. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – 2013. – №4(87). – С.73 – 81.

[38] Василевский В.В. Определение границ оптимальности технологических процессов изготовления / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО–2013: Матеріали 4-ї Всеукраїнської науковопрактичної конференції*. – Херсон : ХДМА, 2013, – С. 276 – 278.

[39] Василевский В.В. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №3. – С.33 – 36.

[40] Vasilevskij V.V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation / V.V. Vasilevskij, M.A. Polyakov // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №5. – С.65 – 67.

[41] Василевский В.В. Моделирование динамики процессов миграции влаги в бумажно-масляной изоляции силового трансформатора / В.В. Василевский // *Тиждень науки 2014: Збірник тез доповідей щорічної науково-*

практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014, – С. 227.

[42] Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.4551.300–97.М.: Изд-во ЭНАС. – 2017.

[43] Leibfried, T. Post-mortem Investigation of Power Transformers – Profiles of Moisture and Degree of Polymerization – Furan Concentration in the Oil as Ageing Assessment Tool [Text] / T. Leibfried, M. Jaya, M. Stach, N. Majer, M. Schäfer, S. Voss // CIGRE Session 2014, paper A2–106.

[44] Алексеев, Б.А. Крупные силовые трансформаторы: Контроль состояния в работе и при ревизии [Текст] / Б.А. Алексеев. – М. "НТФ Энергопрогресс", 2010г. – 88 с.

[45] Khademlahashy, A. Lifetime evaluation of HV transformers [Text] / A. Khademlahashy, G. Mehta, L. Li and J. Zhu // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW. – 2017. – pp. 1–5.

[46] Черкашина, В.В. Анализ эффективности методов оценки механической прочности целлюлозной изоляции высоковольтных трансформаторов [Текст] / В.В. Черкашина // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2006. – №4. – С. 32–36.

[47] Львов, М.Ю. О ресурсе изоляции силовых трансформаторов [Текст] / М. Ю. Львов, В. Б. Комаров, Ю. Н. Львов // Новое в российской электроэнергетике. – 2003. – №4. – С. 38–41.

[48] Gourisetti, S. N. G. A review of transformer aging and control strategies [Text] / S. N. G. Gourisetti, H. Kirkham and D. Sivaraman // 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV. – 2017. – pp. 1–6.

[49] Rahmat, S. Effects of thermal aging on Dielectric Properties and DGA of oil–paper insulations / S. Rahmat, R. A. Pasaribu and Suwarno [Text] // 2016 3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE). – Yogyakarta. – 2016. – pp. 231–234.

[50] Паперный, Л. Е. Учебно-методическое пособие для слушателей курсов повышения квалификации энергетиков и студентов энергетического

факультета БНТУ / Л. Е. Паперный, М. В. Алейникова. – Минск : БНТУ, 2016. – 150 с.

[51] ДСТУ ІЕС 60076–7:2016 Трансформаторы силовые. Часть 7. Руководство по нагрузке для масляных силовых трансформаторов. – [Введен. 01.09.2016].

[52] Мордкович, А.Г. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО [Текст] / А.Г. Мордкович, В.А. Туркот // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №6. – С. 23–28.

[53] Зозуля, Д.В. Анализ опыта эксплуатации главных блочных трансформаторов ОРЦ – 417000/750 блоков АЭС Украины [Текст] / Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2012. – №18. – С. 66–76.

[54] Suwarno Effects of thermal aging on paper characteristics in paper–mineral oil composite insulation [Text] / Suwarno and R. Pasaribu // 2017.

[55] Lelekakis N., Guo W., Martin D. and Wijaya J., A field study of aging in paperoilinsulation systems, IEEE Electrical Insulation Magazine, DEIS Feature article, 2012.

[56] Васин, В.П. Оценки выработанного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов [Текст] / В.П. Васин, А.П. Долин // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №2. – С. 37–41.

[57] Васин, В.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов [Текст] / В.П. Васин, А.П. Долин // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность – 2008. – №3. – С. 12–17.

[58] Андриенко, П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования [Текст] / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. –2014. –№ 2. – С. 32–40.

[59] Ding, H. An overview of water and relative saturation in power transformers 2017 [Text] / H. Ding, R. Heywood, P. Griffin and L. Lewand // IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester. – 2017. – pp. 1–4.

[60] Шутенко, О.В. Прогнозирование остаточного ресурса высоковольтных силовых трансформаторов по значениям степени полимеризации целлюлозы [Текст] / О.В. Шутенко // Международная научная конференция MicroCAD: Секція №10 – Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології. – НТУ "ХПИ". – 2016. – с. 192.

[61] Алексеев, Б.А. Крупные силовые трансформаторы: Контроль состояния в работе и при ревизии [Текст] / Б.А. Алексеев. – М. "НТФ Энергопрогресс", 2010г. – 88 с.

[62] Обложин В.А. Тепловизионный контроль при организации ремонтов электротехнического оборудования по его состоянию / Электрические станции. -2000. № 6. - С. 58-63.

[63] Солдатов А. В. Оптимизации системы охлаждения высоковольтных маслонаполненных вводов. Межвуз. сб. научн. трудов «Высоковольтные техника и электротехнология». ИГЭУ, 2005, том 1, с. 77.

[64] Солдатов А. В. Разработка методов численной реализации математической модели расчета тепловых и гидродинамических полей маслонаполненных вводов трансформаторов. Ивановский энерг. гос. ун-т. Иваново, 2005. — 17 с. — Деп. в ВИНТИ 02.06.2005 № 803-B2005.

[65] Васин, В.П. Финальные аварии силовых трансформаторов [Текст] / В.П. Васин, А.П. Долин // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – №8. – С. 26–41.

[66] М.Г. Баширов, И.В. Прахов, Д.И. Богданов, Е.И. Буланкин, Н.А. Молчанов Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса высоковольтного трансформатора // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2016. №4. URL:



<https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-otsenki-tehnicheskogo-sostoyaniya-i-prognozirovaniya-resursa-vysokovoltnogo-transformatora>.

[67] І.В.Бальзан, Мікропроцесорний пристрій для діагностування обмоток силового масляного трансформатора. Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021)", м. Вінниця, 25-27 жовтня 2011 р. ВНТУ, – Режим доступу: [http://conf.vntu.edu.ua/energo/2011/tezy\\_dopov.pdf](http://conf.vntu.edu.ua/energo/2011/tezy_dopov.pdf).

[68] Пат. 57767 України, М. кл. G 01 R 31/06. Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора / В.В.Грабко, В.В.Грабко, І.В.Бальзан - u201010340; Заявл. 25.08.10; Опубл. 10.03.11; Бюл.№5. – 6 с.

[69] Пат. 57815 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201010744; Заявл. 06.09.2010; Опубл. 10.03.2011; Бюл. №5. – 9 с.

[70] Пат. 60057 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201013620; Заявл. 16.11.2010; Опубл. 10.06.2011; Бюл. №11. – 9 с.

[71] Пат. 60153 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для оцінювання залишкового робочого ресурсу силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201014344; Заявл. 30.11.2010; Опубл. 10.06.2011; Бюл. №11. – 11 с.

[72] Пат. 60152 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для оцінювання залишкового робочого ресурсу силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201014343; Заявл. 30.11.2010; Опубл. 10.06.2011; Бюл. №11. – 10 с.

[73] Пат. 65179 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201106402; Заявл. 23.05.2011; Опубл. 25.11.2011; Бюл. №22. – 8 с.

[74] Пат. 63658 Україна, МПК G 01 R 31 / 06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201106384; Заявл. 23.05.2011; Опубл. 10.10.2011; Бюл. №19. – 9 с.

[75] Пат. 21813 Україна, МПК G 01 R 31/06. Пристрій для вимірювання спрацювання силових трансформаторів / Мокін Б. І., Грабко В. В., Дінь Тхань В'єт; заявник та патентоутримувач Вінницький державний технічний університет. – № 95052359 ; заявл. 16.05.95 ; опубл. 30.04.98, Бюл. № 2.

[76] Пат. 60549 Україна, МПК G 01 R 31 / 00. Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201013607; Заявл. 16.11.2010; Опубл. 25.06.2011; Бюл. №12. – 6 с.

[77] Пат. 141850 UA, МПК G01R 31/00. Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Розводюк К.М., Овчар І.М., Овчар І.М., Вдовиченко В.Є. – № u 201910977; заявл. 07.11.2019; опубл. 27.04.2020, бюл. № 8. – 14 с.: кресл.

[78] Пат. 141849 UA, МПК G01R 31/00. Устройство для определения остаточного ресурса силового масляного трансформатора/Розводюк М.П., Розводюк К.М., Овчар И.М., Овчар И.М., Вдовиченко В.Е. – №u 201910976; заявл. 07.112019; опубл. 27.04.2020, бюл. № 8. – 14 с.: рис.

[79] Пат. 135897 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Бомбик В.С., Овчарук

В.В. – № u 201901323; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 10 с. : кресл.

[80] Пат. 135680 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Овчарук В.В., Бомбик В.С., Левашов С.С. – № u 201901342; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13. – 10 с. : кресл.

[81] Малов А.А., Снетков А.Ю. Тепловизионное обследование силовых трансформаторов // Энергетик. – 2000. – №2. – С.34–35.

[82] Ажищев Р.А., Ажищев А.И. Опыт тепловизионного контроля в АО “Ивэнгерго” // Энергетик. – 2001. – №12. – С.42–43.

[83] Грабко В.В., Грабко В.В. До питання підвищення вірогідності контролю теплового портрета електроенергетичних об’єктів // 3-я Всеукраїнська науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Тези наукових доповідей. – Кременчук: КДПУ, 2004. – С.10.

[84] Анцинов А.В. Контроль исправности систем охлаждения силовых трансформатора с помощью тепловизора // Энергетик. – 2003. – №1. – С.25.

[85] Анцинов А.В. Использование тепловизора для контроля исправности систем охлаждения силовых трансформаторов // Электро. – 2003. – №2. – С. 24–26.

[86] Ключко В.П., Сорокин А.Ю. Тисленко В.В. Тепловизионная диагностика дефектов элементов воздушных линий электропередачи // Энергетика и Электрификация. – 2000. – №7. – С.20–23.

[87] Тепловизионный контроль электротехнического оборудования и опыт диагностики силовых трансформаторов / А. Ю. Хренников, А. В. Рубцов, В. В. Щербаков, С. А. Языков // Электрические станции. – 2006. – № 5. – С. 63–67.

[88] Воронов С. А. Применение тепловизионных систем для теплового неразрушающего контроля / С. А. Воронов, С. А. Мурахов, Н. А. Гордийко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2002. – № 4. – С. 43–47.

[89] Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal Measurement and its Application for Diagnostics of Distribution Oil Transformers. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019;62(6):583-594. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>

[90] Lisowska-Lis, Agnieszka. 2017. “Thermographic Monitoring of the Power Transformers.” *Measurement Automation Monitoring, Measurement Automation Monitoring*, 63 (4): 154–57.

[91] Sikorski, W.; Walczak, K.; Gil, W.; Szymczak, C. On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission Signals. *Energies* 2020, 13, 3271–3307.

[92] Маслова В. А. Термографія в діагностиці і невідшкодувальному контролі / В. А. Маслова, В. А. Стороженко. – Харків : Компанія СМІТ, 2004. –160 с.

[93] Хренников А. Ю. Диагностика состояния электрооборудования электростанций и подстанций с помощью средств инфракрасной техники / А. Ю. Хренников, В. В. Щербаков // *Электро*. – 2006. – №2. – С. 15–20.

[94] Лизунова С.Д. и Лоханина А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга под редакцией М.: Энергоиздат, 2004. - 616 с.

[95] Патент України № 69641, МПК G01R31/06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201111889; Заявл. 10.10. 2011; Опубл. 10.05.2012; Бюл. № 9.–14 с.

[96] Пат. 69642 Україна, МПК G01R31/06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Грабко В.В., Бальзан І.В.; Заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний

університет. – № u201111890; Заявл. 10.10.2011; Опубл. 10.05.2012; Бюл. № 9.–14 с.

[97] Radakovic, Z. Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer", *European Transactions on Electrical Power*, 13, pp. 47-54 (2003).

[98] Witos, F.; Olszewska, A.; Szerszeń, G. Analysis of properties characteristic for acoustic emission signals recorded on-line in power oil transformers. *Acta Phys. Pol. A* 2011, 120, 759–762.

[99] Witos, F.; Olszewska, A.; Opilski, Z.; Lisowska-Lis, A.; Szerszeń, G. Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers. *Energies* 2020, 13, 5955, doi:10.3390/en13225955.

[100] M.A. Taghikhani, A. Gholami Prediction of hottest spot temperature in power transformer windings with non-directed and directed oil-forced cooling. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 31, pp 356-364 (2009).

[101] Pradhan, M.K. and Ramu, T.S. \Prediction of hottest spot temperature (HST) in power and station transformers", *IEEE Trans. Power Delivery*, 18(4), pp. 1275-1283 (Oct. 2003).

[102] С.В. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник. - М: Энергоиздат, 1981.

[103] С.В.Казанський, П.П.Пекур Технічний каталог. Особливості оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів на вітроелектричних станціях, Відновлювальна енергетика, 2017, № Трансформатори. — ОАО «Укрелектроапарат», 2007. — 82 с.

[104] Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов. - М.: Энергоиздат, 1986.

[105] Grabko, V., Tkachenko, S., & Palaniuk, O. (2021). Determination of temperature distribution on windings of oil transformer based on the laws of heat transfer. *ScienceRise*, (5), 3-13. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.002140>.

[106] Хайкин Саймон Нейронные сети. Полный курс. 2-е издание.: Перю. С англ. — СПб. : ООО «Диалектика», 2019. — 1104 с. : ил. — Парал. тит. англ. — ISBN978-5-907144-22-4

[107] Сирота А. А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в MATLAB: учеб. пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 384 с.: ил. ISBN 978-5-9775-3778-0

[108] Сухі трансформатори | Укрелектроапарат | uea.com.ua. Укрелектроапарат. URL: <https://uea.com.ua/product-category/dry-transformer/> (дата звернення: 27.08.2022).

[109] Переваги сухих трансформаторів порівняно з масляними | Блог | ELTIZ. Eltiz. URL: <https://eltiz.ua/uk/blog/perevagi-suhih-transformatoriv/> (дата звернення: 15.10.2021).

[110] MehdipourPicha, H., Bo, R., Chen, H., Rana, M. M., Huang, J., & Hu, F. (2019). Transformer Fault Diagnosis Using Deep Neural Network. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). doi:10.1109/isgt-asia.2019.8881052.

[111] Технический каталог. Трансформаторы. — ОАО «Укрелектроапарат», 2007. — 82 с.

[112] ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271).

[113] Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=29329](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29329) (дата звернення: 12.10.2021)..

[114] Оразбаев Б.Б. Теория и практика методов нечетких множеств. Министерство науки и образования РК, -Бастау, -Алматы, 2014, 488 с.

[115] Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В. В. Кирик.— Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» 2019.— 224с. ISBN 978-966-622-969-7.

[116] Зак Ю.А. Прийняття рішень в умовах нечітких і розмитих даних: Fuzzy-технології / Ю.А. Зак. - М.: Ленанд, 2016. - 352 с.

[117] В. В. Грабко і О. В. Паланюк, «НЕЧІТКА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТЕРМІНУ РОБОТИ СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМІ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ», *Вісник ВПІ*, вип. 4, с. 27–33, Верес. 2022.

[118] Принципи штучних нейронних мереж та їх застосування: навч. посібник/ Тимощук П. В., Лобур М. В. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 292 с. — ISBN 978-966-941-535-6

[119] Голоднов Ю. М. Контроль за состоянием трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 88 с., ил.

[120] Грабко В.В., Березницький Д.О. Математична модель для побудови ресурсних характеристик силового трансформатора, який працює в режимі перевантаження // *Вісник ВПІ*. – 2008. - №1. – С.55 - 58.

[121] Антипенский Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. – М.: Техносфера, 2007. – 128 с.

[122] Губарев, В. Ф. Моделювання та ідентифікація складних систем : монографія / В. Ф. Губарев ; ІКД НАНУ, ДКА НАНУ. — Київ : Наук. думка, 2019. — 248 с.

[123] Сворень Р. А. Электроника шаг за шагом / Р. А. Сворень. — Москва : ДМК Пресс, 2021. — 504 с.

[124] Гаврилов С.А., Бартош А.И. Схемотехника. От азов до создания практических устройств.— СПб.: Наука и Техника, 2020.— 528 с., илл.

[125] Бабіченко А.К., Красніков І.Л., Бабіченко Ю.А., Вельма В.І., Лисаченко І.Г., Подустов М.О., Дзевочко О.М., Мікропроцесорні засоби в автоматизованих системах керування технологічними процесами; за ред. А.К. Бабіченка. – Х.: Вид-во ТОВ "Водний Спектр Джі-Ем-Пі", 2016 р. – 440 с.

[126] Мікропроцесорні пристрої: навч. посібник для студентів зі спец-ті «Електроніка» / Т.О.Терещенко, В.А.Тодоренко, Л.М.Батрак, Ю.С.Ямненко. – К.: Кафедра. 2017. – 244с..

[127] Нарышкин А.К. Цифровые устройства и микропроцессоры. / А.К. Нарышкин. – М.: Академия, 2006. – 320 с.

[128] Гуров В.В. Микропроцессорные системы: учебник / В.В. Гуров. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 336 с.

[129] Иванов Ю.И., Югай В.Я. Микропроцессорные устройства систем управления: Учебное пособие. / Ю.И. Иванов, В.Я. Югай - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. - 133 с.

[130] Солонина А. И., Арбузов С. М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

[131] Степанова, Е. А., Скулкина Н. А., Волегов А. С. Основы обработки результатов измерений,; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 95 с. ISBN 978-5-7996-1331-0.

[132] Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук; за ред. Є. С. Поліщука та В. М. Ванька. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584 с..

[133] Вимірювання температури: теорія і практика / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. – Львів : Видавництво Бескид Біт, 2006. – 560 с.

[134] Г.Н. Лукьянов, Сенсоры и датчики физических величин – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 57 с.

[135] Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89 с.: ил. 64. – ISBN 978-5-91646-188-6.

[136] Дж. Фрайден, Современные датчики. Справочник Москва: Техносфера, 2005. - 592 с. ISBN 5-94836-050-4.



[137] Аничкин А., Смирнов А. Применение встроенных трансформаторов тока в современных условиях. – Энергетика и ТЭК, №3, 2009.

[138] Николайчук, Я.М. Теорія джерел інформації [Текст] / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТНЕУ, 2008. – 536с.

[139] Преобразователи измерительные переменного тока (датчики тока). — Текст : электронный // АО «НИИЭМ» : [сайт]. — URL: <http://www.niiem.ru/deyat/detectors> (дата обращения: 29.08.2022).

[140] Лизан И.Я., Маренич К.Н., Ковалёва И.В., Пичко Н.С., Сухарев В.И., Зубова Я.В. Теоретические основы электротехники : учебник – Москва : Инфра-Инженерия, 2021 г. - 628 с.

[141] Резисторы : справочник / [Дубровский В. В., Иванов Д. М., Пратусевич Н. Я. и др.] ; под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. – [2-е изд.]. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.

[142] Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМКПресс, 2008. – 832 с.: ил.

[143] Лукутин Б. В. , Обухов С. Г. Силовые преобразователи в электроснабжении. Учебное пособие. – Томск, Изд. ТПУ, 2013, -148 с..

[144] Горячкин О.В. Статистическая теория радиотехнических систем : учебное пособие / Горячкин О.В.. — Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. — 92 с. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/75408.html> .

[145] В. Б. Кашкин, А. А. Баскова, А. С. Пустошилов, Я. И. Сенченко, Статистическая радиотехника : учебное пособие /; Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. - Красноярск : СФУ, 2021 (2020-03-16). - 152 с. : ил., цв. ил. - Библиогр.: с. 134. - 100 экз. - ISBN 978-5-7638-4320-0 : 314.00 р. - Изд. № 2020-11211.

[146] Плескунов, М.А. Теория вероятностей : справочник / М.А. Плескунов, Л.В. Корчёмкина. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 136 с. ISBN 978-5-7996-1946-6.

[147] Топильский В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. М. : Техносфера, 2014. 288 с.

[148] Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи. — М.: БИНОМ, 2013. — 499 с.

[149] Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки. Том 1. Електронний підручник для вищих навчальних закладів / Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Ямненко Ю. С., Заграничний А. В. Київ, 2016. 399 с.

[150] Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.

[151] Березкин Е.Ф. Основы теории информации и кодирования: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 312 с.

[152] Кушлик-Дивульська О. І., Кушлик Б. Р. Основи теорії прийняття рішень. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 94 с.

[153] Основы статистического обучения. Интеллектуальный анализ данных, логический вывод и прогнозирование / Т. Хасти, Р.Тибширани, Дж. Фридман. – второе издание. – Springer, 2020, 768с.

[154] Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учебник / Е.С. Вентцель. – 10-е издание, стереотипное. – Москва : Высшая школа, 2006. – 575 с. : ил. – гриф . – ISBN 5-06-005688-0.

[155] Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений / В. Хаушильд, В. Мош : пер. с нем. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 312 с.

[156] Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников : учебное пособие / А. И. Кобзарь. — 2-е изд. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 816 с. — ISBN 978-5-9221-1375-5.

[157] О. В. Паланюк, «МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА», Вісник ВПІ, вип. 2, с. 54–59, Квіт. 2022.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А

## НЕЧІТКА БАЗА ЗНАНЬ

x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	d
Н	Н	Н	Н	
Н	С	Н	Н	
Н	В	Н	Н	
Н	Н	С	Н	
Н	С	С	Н	
Н	В	С	Н	
Н	Н	В	Н	
Н	С	В	Н	
Н	Н	С	С	
Н	С	С	С	
Н	Н	С	В	
Н	Н	В	Н	
Н	Н	В	С	
Н	Н	В	В	
Н	Н	Н	В	
Н	С	Н	В	
С	Н	Н	Н	d <sub>1</sub>
С	С	Н	Н	
С	В	Н	Н	
С	Н	С	Н	
С	С	С	Н	
С	Н	В	Н	
С	С	В	Н	
С	Н	С	С	
С	С	С	С	
С	Н	С	В	
С	Н	В	Н	
С	Н	В	С	
С	Н	В	В	
С	Н	Н	В	
В	Н	Н	Н	
В	Н	С	Н	

Продовження таблиці

x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	d
В	Н	В	Н	d <sub>1</sub>
В	Н	С	С	
В	Н	В	Н	
В	Н	Н	В	
Н	В	В	Н	d <sub>2</sub>
Н	В	С	С	
Н	С	С	В	
Н	В	С	В	
Н	С	В	Н	
Н	В	В	Н	
Н	С	В	С	
Н	С	В	В	
Н	В	Н	В	
С	В	С	Н	
С	В	В	Н	
С	В	С	С	
С	С	С	В	
С	В	С	В	
С	В	В	Н	
С	С	В	С	
С	С	Н	В	
С	В	Н	В	
В	С	Н	Н	
В	С	С	Н	
В	С	В	Н	
В	С	С	С	
В	Н	С	В	
В	С	В	Н	
В	Н	В	С	
В	Н	В	В	
В	С	Н	В	
Н	В	В	Н	d <sub>3</sub>
Н	В	С	С	

Продовження таблиці

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	d
C	B	B	C	$d_3$
C	C	B	B	
B	B	H	H	
B	B	C	H	
B	B	B	H	
B	B	C	C	
B	C	C	B	
B	B	C	B	
B	B	B	H	
B	C	B	C	
B	C	B	B	
B	B	H	B	
C	B	B	B	$d_4$
B	B	B	C	
B	B	B	B	

**Додаток Б****СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА**

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:**

[1] Паланюк, О.В. 2022. МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2 (Квіт. 2022), 54–59. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-54-59>.

[2] Грабко, В.В. і Паланюк, О.В. 2022. НЕЧІТКА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТЕРМІНУ РОБОТИ СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМІ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 4 (Верес. 2022), 27–33. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-27-33>.

[3] Паланюк, О.В. 2022. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВИТРАЧАННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 6 (Груд. 2022), 42–47. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-42-47>.

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у закордонному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу:**

[4] Grabko, V., Tkachenko, S., & Palaniuk, O. (2021). Determination of temperature distribution on windings of oil transformer based on the laws of heat transfer. *ScienceRise*, (5), 3-13. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.002140>.

**– документи інтелектуальної власності, що отримані за**



**результатами дисертації – патенти на корисну модель:**

[5] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/00. № 141472 МПК (2006), 10.04.2020.

[6] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R31/62. № 144739 МПК (2020), 26.10.2020.

[7] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк, В. П. Ткачук «Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/06. № 137542 МПК (2006.01), 25.10.2019.

[8] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/62. № 140601 МПК (2020.01), 10.03.2020.

[9] В.В Грабко, В.В. Грабко, О.В. Паланюк «Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора» Патент України G01R 31/00. № 141471 МПК (2006), 10.04.2020.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

[10] О. В. Паланюк «Способи діагностування пошкоджень і аналізу ресурсу обмоток силового трансформатора». "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)", м. Вінниця, 15-17 жовтня 2018 р. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22717>.

[11] О. В. Паланюк, В.В, Грабко «Математична модель для оцінки стану ізоляції силового трансформатора на основі теорії нечітких множин». Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021)", м. Вінниця, 13 жовтня 2021 р. ВНТУ,– Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey2021/paper/view/137> -21.

[12] О. В. Паланюк, «Можливості іот для використання в енергетиці і промисловості» XLVIII Науково-технічна конференція факультету

електроенергетики та електромеханіки (2019)  
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7084>.

[13] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «Застосування нейронної мережі для діагностування силового сухого трансформатора» // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10354>.

[14] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «Математична модель для діагностування силового сухого трансформатора» // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10155>.

[15] В. В. Грабко, О. В. Паланюк «До питання діагностування силового трансформатора»// Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Електрон. текст. дані. – 2019. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7294>.

**Додаток В**

**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

## АКТ

підтвердження наміру впровадження у ТОВ «Тонус-Плюс Девелопмент» окремих результатів, одержаних Паланюком Олександром Вячеславовичем у дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії за темою "Методи і засоби діагностування обмоток силових трансформаторів розподільних електричних мереж"

Ми, що нижче підписались, директор ТОВ «Тонус-Плюс Девелопмент» Окрема Олександр Ігорович та головний інженер Найда Руслан Романович, підтверджуємо, що після ознайомлення з дисертацією Паланюка Олександра Вячеславовича на тему "Методи і засоби діагностування обмоток силових трансформаторів розподільних електричних мереж" на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка, керівництвом ТОВ «Тонус-Плюс Девелопмент» було прийняте рішення, що в процесі будівництва нових електричних підстанцій, при замовленні нових силових трансформаторів, буде здійснюватися впровадження рекомендацій, запропонованих Паланюком О. В. у розділах 2 та 3 його дисертації.

Директор

ТОВ «Тонус-Плюс Девелопмент»

02.09.2022 р.

дата



Окрема О. І.

підпис

Головний інженер

ТОВ «Тонус-Плюс Девелопмент»

02.09.2022 р.

дата



Найда Р. Р.

підпис



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної  
роботи та організації освітнього процесу  
Олександр ПЕТРОВ  
«грудня» 2022 р.

впровадження в навчальний процес результатів,  
отриманих Олександром ПАЛАНЮКОМ під час навчання в аспірантурі  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в  
дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії на тему:  
«Методи і засоби діагностування обмоток силових трансформаторів  
розподільних електричних мереж»

Комісія у складі: декана факультету електроенергетики та електромеханіки (ФЕЕЕМ) к. т. н., доц. Розводюка М.П.; заступника декана ФЕЕЕМ з навчально-методичної роботи к. т. н., доц. Тепті В.В., в. о. завідувача кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів к. т. н., доц. Мошноріза М.М., підтверджує, що при викладанні теоретичних основ навчальних дисциплін: «Електричні машини» та «Моделювання електромеханічних систем», а також в дипломному проектуванні студентами, які навчаються за освітніми програмами «Електромеханіка» та «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, використовується частина результатів, отриманих аспірантом Паланюком О. В. в процесі написання ним дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії, а саме:

- 1) математична модель визначення теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного трансформатора на основі законів теплопередачі;
- 2) нечіткі математичні моделі для оцінки теплового старіння ізоляції обмоток силового масляного і сухого трансформатора, що працює в режимі перевантаження;
- 3) алгоритми роботи мікропроцесорного пристрою для діагностування залишкового ресурсу ізоляції трансформатора на основі законів теплопередачі.

Декан факультету електроенергетики  
та електромеханіки, к. т. н., доцент

Михайло РОЗВОДУК

Заступник декана факультету  
електроенергетики та  
електромеханіки, з навчально-  
методичної роботи к. т. н., доцент

Віра ТЕПТЯ

В. о. завідувача кафедри  
комп'ютеризованих електромеханічних  
систем і комплексів, к. т. н., доцент

Микола МОШНОРИЗ